أسس شبكات توزيع القوى الكهربية

التأريض الوقائي



دكتور
آسر علي زكي
أستاذ هندسة القوى الكهربية

دكتور
أحمد حلمي راشد
أستاذ هندسة القوى الكهربية المساعد

كلية الهندسة
جامعة الإسكندرية

الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية
جلال حزى وشركاه

أسس شبكات توزيع القوى الكهربية

التأريض الوقائي

دكتور
آسر علي زكي
أستاذ هندسة القوى الكهربية

دكتور
أحمد حلمي راشد
أستاذ هندسة القوى الكهربية المساعد

كلية الهندسة
جامعة الاسكندرية

الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية
جلال حزي وشركاه

الطبعة الاولى ١٩٨٣

الفنيــة للطبــاعة والنشر ـ ٤٨ ش جــودة راس التين ـ الاسكندرية

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة

هذا الكتيب هو الأول من خمسة كتيبات فى موضوع اسس شبكات توزيع القوى الكهربية · وقد اخترنا أن يكون موضوعه هو التأريض الوقائى فى شبكات التوزيع حيث اننا شعرنا بنقص واضح فى هذا الموضوع سواء فى كتب شبكات القوى الكهربية أو فى التطبيق العملى للتأريض الوقائى بالنسبة لشبكات توزيع الجهد المنخفض فى مصر والدول النامية عامة · ونظرا لأن التقدم الحضارى والارتفاع فى مستوى المعيشة يصحبه زيادة كبيرة ومستمرة فى استخدامات الاجهزة والمعدات الكهربية سواء فى المنازل أو فى الورش والمصانع الصغيرة ، فان ذلك يدعو الى إعادة النظر فى نظم التأريض الوقائى (ان وجدت) فى هذه البلاد حرصا على سلامة المستهلك ·

ورغم أن موضوع التأريض ليس سهلا الا اننا قد حاولنا أن نقدم للقارىء العربى المبادىء الاساسية التى تمكنه من فهمه واستيعابه وتقدير أهميته وتؤهله لمتابعة مختلف المواصفات القياسية العالمية والمراجع الخاصة بالتأريض ، ومن ثم المناشدة والاقدام على تطبيق التأريض الوقائى فى مختلف شبكات التوزيع·

وسوف يتلو هذا الكتيب الكتيبات الاربع الاخرى والتى ستتناول الموضوعات الآتية :

الكتيب الثانى : نظم التوزيع وتنظيم الجهد ٠

الكتيب الثالث : حساب الاخطاء ونظم الوقاية ٠

الكتيب الرابع : الكابلات ومحولات التوزيع ٠

الكتيب الخامس : الاضـــــاءة ٠

واننا نرجو أن نكون بهذه السلسلة قد غطينا أهـــم الموضـــوعات المتعلقة بشبكات التوزيع سواء من الناحية الاكاديمية أو من الناحية العملية ٠

ولقد كان من الممـكن ، وربما من الاسهل ، أن يتـم تأليف تلك الكتيبات باللغة الانجليزية ٠ إلا ان رغبـــة منا فى اثراء المكتبة العلمية العربيـــة ، فقد رأينا أن يكون التأليف باللغة العربية بالرغم مما قد يلاقيه المؤلف من بعض الصعوبات فى ترجمة بعض الاصطلاحات العلمية الخاصة ٠ ونأمل أن نكون قد وفقنا فى هدفنا هذا وفى الاضافة الى رصيد المكتبة العلمية العربية ٠

ونود فى النهاية أن نقدم الشكر لمنشـــأة المعارف التى قامت بنشر هـذا الكتاب وللمطبعة الفنيـــة بالاســـكندرية والعاملين بها لما قاموا به من مجهود لإخراجه على هذه الصـــورة ٠

والله ولى التوفيق

الاسكندرية فى يونيو ١٩٨٣

د٠ آسر عـــلى زكى

د٠ احمد حلمى راشد

محتويات الكتاب

الفصل الاول

تأثير التيـــار على الانسان

الفصل الثـــانى

المقـــاومة الارضيــة

الفصل الثـــالث

الكترودات التأريض

الفصل الرابع

جهد الخطـــوة وجهد اللمس

الفصل الخامس

نظـــام التأريض

الفصل الأول

تــأثير التيـــــار على الانسان

1. 1 مقـــــدمة

تنقسم التوصيلات الارضية الى نوعين رئيسيين :

1 ـ تأريض المنظومة ٠

2 ـ تأريض المعدات أو التأريض الوقائى ٠

يعتمد النوع الاول من التأريض أساسا على متطلبات تشغيل الشبكة بحيث يكون آداؤها على أمثل وجه ٠ وتعتمد هذه المتطلبات على عدة عوامل مثل شـدة الاجهاد الكهربى المسموح به للعزل وشدة تيار القصر عند حـدوث خطأ أرضى والخواص الوقائية الكلية للمنظومة ٠

أما النوع الثانى من التاريض ، وهو موضوع هذا الجزء ، فالغرض الاساسى منه هو حماية الافراد (عمال التشغيل والاصلاح أو الفنيين أو الجمهور العـام) من الاصابة بصدمة كهربية نتيجة لمس أى جزء معدنى من المفروض الا يكـون حيا ولا حاملا لاى تيار كهربى ٠ ويتم ذلك عن طريق التأريض المتعمـد لجميـع الانشآت المعدنية ، وهياكل المولدات والمتورات ، والصناديق المعدنية لمعـدات التحكم ، ودرع الكابلات ، وصناديق التوصيل، ومجرى الكابلات وجميع الاجسام المعدنية التى تحتوى أو تجاور دائرة كهربائية ويمكن لاى فرد أن يلمسها ٠

فى حالة حدوث تلامس غير مقصود أو قصر بين موصل الدائرة الكهربائية والجسم المعدنى، يرتفع جهد الجسم الى جهد الموصل ، فإذا لم يكن هذا الجسم مؤرضا عمدا ، فهو منعزل كهربيا عن الارض ٠ وفى هذه الحالة يمكن اعتبار

موصلا بالارض عن طريق مقاومة قدرها مئات أو آلاف الاومات بدلا من بضع أومات اذا كان مؤرضا عمدا ، أو ملايين الاومات اذا كان معزولا عمدا · ونتيجة لذلك ، وبالاضافة الى ارتفاع جهد الجسم الى قيمة قد تشكل خطرا على حياة الانسان ، يمر تيار تسرب الى الارض قد يؤدى ، رغم صغره ، الى نشوب حريق ؛ والسبب فى ذلك أن دوام التيار يؤدى الى ارتفاع درجة حرارة أى مواد يحملها هذا التيار وقد تكون سريعة الالتهاب ·

والتاريض المتعمد للاجسام المعدنية ، وهو التاريض الوقائى ، له غرضان :

1 ـ منع جهد الجسم من الارتفاع الى قيمة قد تشكل خطرا على الانسان·

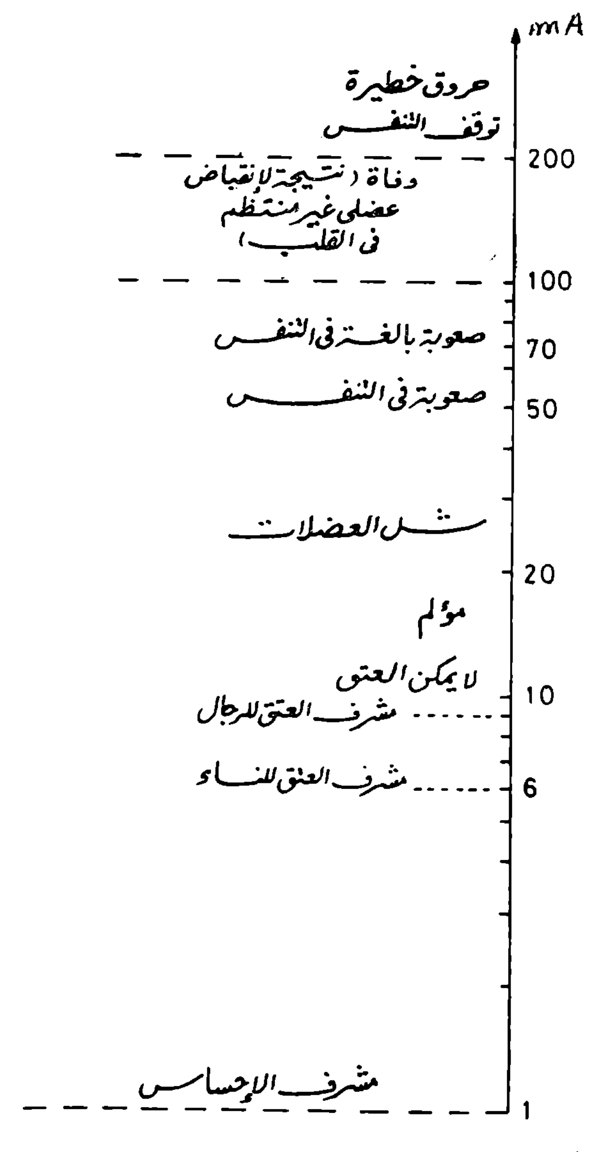
2 ـ السماح بمرور تيار للارض له قيمة كافية لتشغيل الاجهزة الوقائية (مصهرات أو قواطع) أو الاجهزة الخاصة بكشف أى خطأ للارض ·

ولانجاز هذه الاغراض يشترط الا تتعدى قيمة المقاومة للارض عند نقطة التأريض قدرا معينا تحدده عادة المواصفات القياسية ويتراوح بين 1 و 25 أوم على حسب شدة تيار القصر ·

2.1 حجم التيارات الخطرة على حياة الانسان

من المعروف ان الصدمة الكهربائية يمكن أن تصيب الانسان أو الحيوان باصابات بالغة أو تؤدى الى الموت (الصعق الكهربى) · وتتوقف درجةالاصابة على ظروف عديدة عند وقوع الحادث وأهمها هو حجم التيار الذى يمر فى جسم الانسان ومسار هذا التيار عبر الجسم والحالة البدنية للشخص المصاب ·

لقد أظهرت التجارب والملاحظات أن تاثير التيار الكهربى ذو الترددالمنخفض (50 - 100 هرتز) على جسم الانسان يختلف باختلاف حجم هذا التيار المار فى منطقة الصدر . ويبين الشكل 1-1 هذه التأثيرات اذا كان زمن دوام التيار بضعة ثوانى أو أكثر ·



شكل 1-1. تأثير حجم تيار الصدمة الكهربية بالمللى أمبير على جسم الانسان لفترة دوام التيار بضعة ثوانى

والحد الادنى للاحساس بالتيار هو حوالى واحد ميلى أمبير . ويصبح هذا الاحساس مؤلما اذا زاد التيار عن 10 ميلى أمبير . وبين 10 و 20 م.أ يفقد الانسان قدرة التحكم فى عضلاته بحيث انه اذا أمسك بيده الجسم المكهرب لا يستطيع اعتاقه . ومع ازدياد حجم التيار يصبح التنفس صعبا وتصاب

العضلات بشلل • وهذه التأثيرات ليست دائمة وانما تختفى اذا تم فصل التيار خلال بضعة ثوانى أو أقل (عن طريق المرحلات وأجهزة الوقاية سريعة العمل)• وحتى فى حالة التوقف التام للتنفس ، يمكن انقـــاذ المصاب من الاختنـــاق باستخدام التنفس الصناعى • أما اذا كان حجم التيار بين200 و 100 م٠أ فالصدمة الكهربائية تكون مميتة • والسبب فى ذلك هو أن فى حدود هذه القيم للتيار،يصاب القلب بحالة انقباض بطينى غير منتظم (*ventricular fibrillation*) وهى أخطر من توقف القلب حيث انه لا يمكن اسعافها بطرق الانعاش العادية ولذلك تؤدى حتما الى وفاة المصاب •

واذا زاد التيار عن 200 م٠أ فيؤدى ذلك الى توقف القلب والتنفس والى الاصابة بحروق خطرة ، الا انه اذا تم اسعاف المصاب فـــورا يمكن انعـــاشه وانقاذه من الموت •

3.1 تأثير زمن دوام التيار على خطورته

يتضح مما سبق انه للحد من حدوث صدمات كهربية تؤدى الى وفاة المصاب يجب أن يكون حجم تيار الصـــدمة أقل من الحـــد الادنى للتيار الذى يسبب الانقباض العضلى غير منتظم فى القلب • وكما ذكرنا فان حجم هذا التيار هو حوالى 100 ميلى أمبير (القيمة الفعلية تختلف باختلاف وزن الجسم) اذا دام لاكثر من بضعة ثوانى • وتدل التجارب والاحصائيات أن كلما قــل زمــن مرور التيـــار كلما استطاع الانســـان أن يتحمل تيـــارات أكبر بدون حدوث الانقباض العضلى فى القلب • ورغم أن هناك اجماع تام بين العاملين فى هذا المجال على أهمية عنصر الزمن ، الا أنه لا يوجد أى قانون أو معادلة عامة متفق عليها دوليا للربط بين زمن مرور التيار والحد الادنى لحجم التيار الذى يؤدى الى الانقباض • ولعل أكثر علاقة استخداما هى العلاقة التجريبية التى توصل اليها دالذيل (1) بعد تحليل عديد من التجارب والتى عدلت مؤخرا بعد مزيــد من

---

(1) *C. F. Dalziel, "Dangerous electric currents" AIEE Trans., Vol.* 65, *pp.* 579 - 585, *and* 1123 - 1124, 1946

التجارب (2) · وهذه العلاقة هى :

$$I_b = k / \sqrt{t} \ ampere \qquad (1 - 1)$$

حيث t هو زمن دوام تيار الصدمة I_b بالثانية ، و k هو ثابت تعتمد قيمته على وزن جسم الانسان ·

$k = 0.116$ بالنسبة الى 99.5% من الاشخاص الذين يزنون 50 كيلو جرام

$k = 0.157$ بالنسبة الى 99.5% من الاشخاص الذين يزنون 70 كيلو جرام

واذا فرضنا أن $k = 0.116$ ، نجد أن

$$I_b = 116 \ mA \qquad t = 1 \ sec$$

$$I_b = 367 \ mA \qquad t = 0.1 \ sec.$$

وجدير بالذكر أن هذه المعادلة مبنية على تجارب تراوح فيها زمن دوام التيار بين 0.03 ثانية و 3 ثوانى ، وعلى فرض أن المقاومة الكلية لجسم الانسان هى ألف أوم (انظرفقرة 4.1) .

واذا كان هناك احتمال أن يطول زمن الصدمة بدون اسعافات فورية ، فلتفادى أختناق المصاب نتيجة لتوقف التنفس ، يستحسن أن يكون الحد الأقصىلتيار الصدمة هو 25 م·أ بدلا من 100 م·أ ، الا أن البعض يفضل ألا يزيد حجم التيار فى هذهالحالةعن حد الاعتاق (9م·أ للرجال ، و 6 م·أ للنساء) ·

---

(2) *J. G. Sverak, W.K. Dick, T.H Dodds and R.H. Heppe,* "*Safe substation grounding - Part* 1" *IEEE Trans. PAS, p.* 4281, *September* 1981

وتبين المعادلة (1-1) أنه يمكن السماح بمرور تيار صدمة أكبر اذا استخدمت أجهزة وقاية سريعة العمل لفصل الخطأ الكهربى والحد من زمن دوامه ٠

4.1 المقاومة الكهربية لجسم الانسان

من الصعب تحديد قيمة المقاومة الكهربية لجسم الانسان بدقة فهذه المقاومة تعتمد على عدة عوامل من بينها السن ، والوزن ، والحالة البدنية ، ودرجة جفاف الجلد ووضع الجسم عند حدوث الصدمة ٠ وتتكون مقاومة الجسم عامة من مقاوة الجلد والمقاومة الداخلية للجسم ٠

وتتراوح مقاومة الجلد بين 1000 أوم/سم٢ للجلد المبتل و 3×10^5 أوم/سم٢ للجلد الجاف ، وقد تكون أكثر من ذلك بالنسبة للأيدى المخشنة نتيجة للعمل اليدوى ٠

أما المقاومة الداخلية للجسم فهى فى حدود 400 - 600 أوم بين الأطراف (يد الى يد أو يد الى قدم أو قدم لقدم)٠

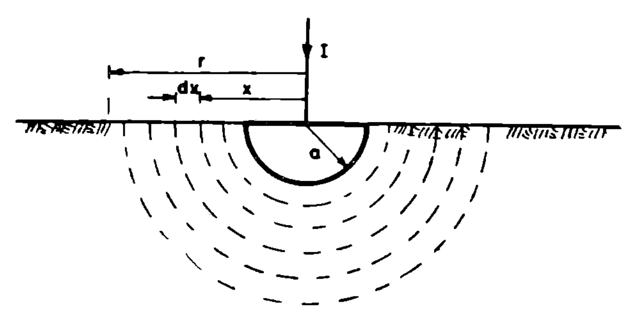
ورغم أن هناك تفاوتا كبيرا فى قيمة المقاومة الكلية للجسم الا أن بناء على التجارب العديدة والخبرة ترى جمعية ال *IEEE* الامريكية أن 1000 أوم هى قيمة مناسبة لمقاومة الجسم الكلية بين الأطراف ، وهى القيمة التى سوف نستخدمها فيما يلى ٠

الفصل الثانى

المقـــاومة الارضيـــة

1.2 المقاومة الأرضية لالكترود نصــف كروى

ان الشــكل النصف كروى (شكل 2 - 1) هو أبسط الاشــكال الهندسية لالكترودات التأريض من حيث سهولة حساب مقاومتها للارض • واذا تصورنا أن المنطقة التى حول الالكترود مقسمة الى قشر نصف كروية متساوية الســمك وبفرض مقاومية منتظمة للتربة ، فمن الواضح أن أكبر مقـــاومة هى للقشرة المجاورة للالكترود حيث أن لها أصغر مساحة عمودية على مســـار التيـــار • وكل قشرة من القشر المتتالية لها مساحة أكبر وبالتالى مقاومة أصغر من القشرة التى قبلهـــا •



شـــــكل 2 - 1

ويمكن حساب المقاومة بين الالكترود وبين الارض كالآتى • فلنفرض أن نصف قطر الالكترود هو a متر وأنه يحمل للارض تيارا I أمبير وأن مقاومية الأرض هى ρ أوم ـ متر • المقاومة العنصرية لقشرة نصف قطرها x وسمكها dx هـى :

$$dR = \rho\, dx / 2\pi x^2$$

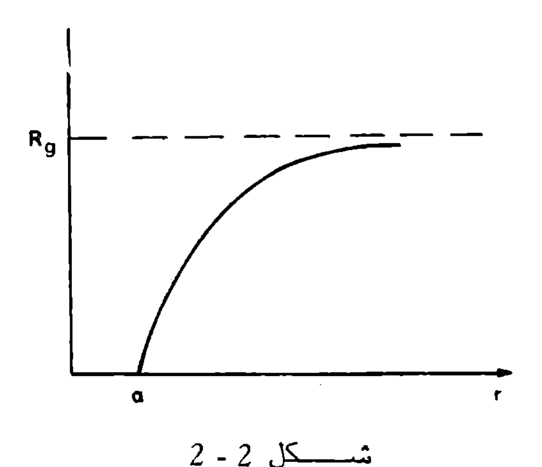
والمقاومة بين سطح الالكترود وأى نقطة على بعد r من مركزه هى ،

$$R = \int_a^r dR = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r}\right) \qquad (1 - 2)$$

واذا افترضنا أن r هى نقطة فى مالا نهاية ، تصبح المقاومة المطلقة للالكترود ،

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi a}\ ohm \qquad (2 - 2)$$

ويبين الشكل 2 - 2 منحنى تغير مقاومة الالكترود النصف كروى مع المسافة · ويتضح من المعادلة (2 - 1) أن 90% من المقاومة المطلقة بين **الالكترود** والارض مركزة فى منطقة حول الالكترود نصف قطرها عشرة أمثال نصف قطر الالكترود نفسه ·

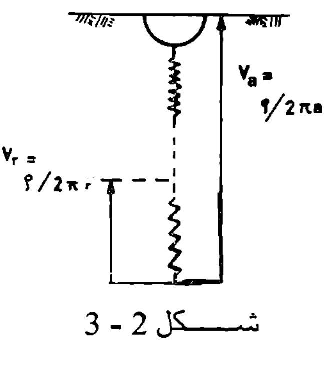


شكل 2 - 2

ومن الواضح أن فرق الجهد بين الالكترود وبين أى نقطة تبعد مسافة r منه هو ،

$$V_{ar} = IR = \frac{I\rho}{2\pi a} - \frac{I\rho}{2\pi r} \qquad (3 - 2)$$

واذا تذكرنا أن الجهد المطلق عند أى نقطة هو الجهد عند هذه النقطة بالنسبة لنقطة تقع فى مالا نهاية (جهدها صفر) فان الجهـد المطلق للالكترود هـو (شـكل 2 - 3) ٠



شـكل 2 - 3

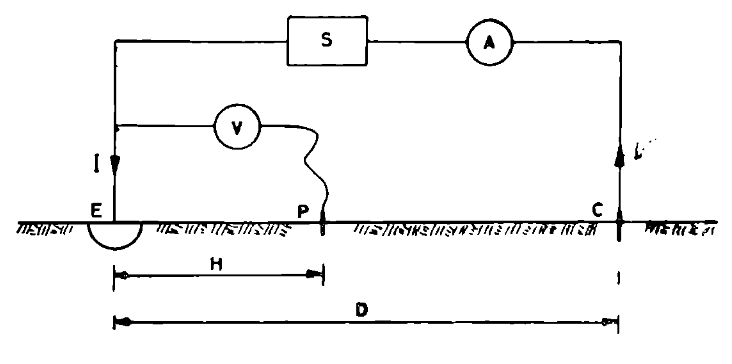
$$V_a = \frac{I\rho}{2\pi a}$$

والجهد المطلق للنقطـة r هـو

$$V_r = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

2.2 طريقة قياس مقاومة الكترود التأريض

لعل الطريقة الاكثر تعويلا والاكثر استخداما لقياس المقاومة للارض لالكترود التأريض هى المعروفة باسم طريقة هبوط الجهد (*fall - of - potential method*) وفى هذه الطريقة (شكل 2 - 4) يمثل E الكترود التأريض ، و P و C هما الكترودان مساعدان ٠ واذا مر تيار I بين E و C وكان فرق الجهـد بين E و P هـو V ، فان خارج القسمة V/I (تحت شروط مناسبة سنذكرها فيما يلى) يعطى المقاومة المطلوبة للالكترود E ٠ وجدير بالذكر أن مصـدر التيار I هـو المنبع S الذى يولد جهدا ثابتا ٠ وينبغى أن يكون التيار اما مترددا أو مستمرا مع تغير دورى فى اتجاهه وذلك لتفادى حدوث أى تحليل كهربائى ٠ ويفضل أن يكون التردد أعلى من تردد القوى ، أى بين 70 و 80 هرتز ، وذلك لتسهيل ازالة التيرات الشاردة ذات تردد القوى ٠



شكل 2 - 4 . طريقة قياس مقاومة الكترود للارض

فلنفرض أنه يمكن اعتبار الالكترود E نصف كرة نصف قطرها a ، الالكترود المساعد C (الكترود التيار) على مسافة D من مركز نصف الكرة ، والالكترود المساعد P (الكترود الجهد) على مسافة H من مركز الكرة ، ولنفرض أيضا أن تيارا I يدخل عند E ويخرج عند C. بالرجوع الى الفقرة السابقة نستطيع أن نعبر عن الجهود عند النقط المختلفة كالآتى :

الجهد المطلق عند E الناتج عن دخول التيـــار : $I\rho / 2\pi a$

الجهد المطلق عند E الناتج عن خروج التيار عند C :

$$- I \rho/2\pi (D - a)$$

$$= - I\rho/2\pi D \qquad (D \gg a)$$

(ويلاحظ العلامة السالبة وهى نتيجة لانعكاس اتجاه التيار)

اذا ، فالجهد المطلق الكلى عند النقطة E هـــو ،

$$V_E = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D}\right)$$

الجهد المطلق عند P الناتج عن دخول التيار عند E : $I\rho/2\pi H$

الجهد المطلق عند P الناتج عن خروج التيار عند C : $-I\rho / 2\pi(D-H)$

اذا فالجهد المطلق الكلى عند النقطة P هـــو ،

$$V_P = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{H} - \frac{1}{D - H}\right)$$

وفرق الجهد بين النقطة E والنقطة P هـو اذا

$$V_{EP} = V_E - V_P = V$$

$$= \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D} - \frac{1}{H} + \frac{1}{D - H}\right)$$

وإذا وضعنا ،

$$D/a = c \ ; \ H/a = p$$

فالمقاومة المقاســة بين E و P هــى ،

$$R_{EP} = V/I = \frac{\rho}{2\pi a}\left(1 - \frac{1}{c} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c - p}\right)$$

وحيث أن المقاومة الحقيقية لنصف الكرة هــى $\rho/2\pi a$ ، نجد أن للنسـبة بين المقاومة المقاسة والمقاومة الحقيقية هــى ،

$$\frac{\text{المقاومة المقاسة}}{\text{المقاومة الحقيقية}} = 1 - \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{c - p}\right) \qquad (4 - 2)$$

وتمثل الكمية التى بين القوسين الخطأ الكسرى الناتـج عن اختيار المسافات D و H . ولكى يصبح هـذا الخطـأ صـــفرا ،

$$\frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{c - p} = 0$$

$$p^2 + cp - c^2 = 0$$

والجـذر الموجب لـ p هـــو

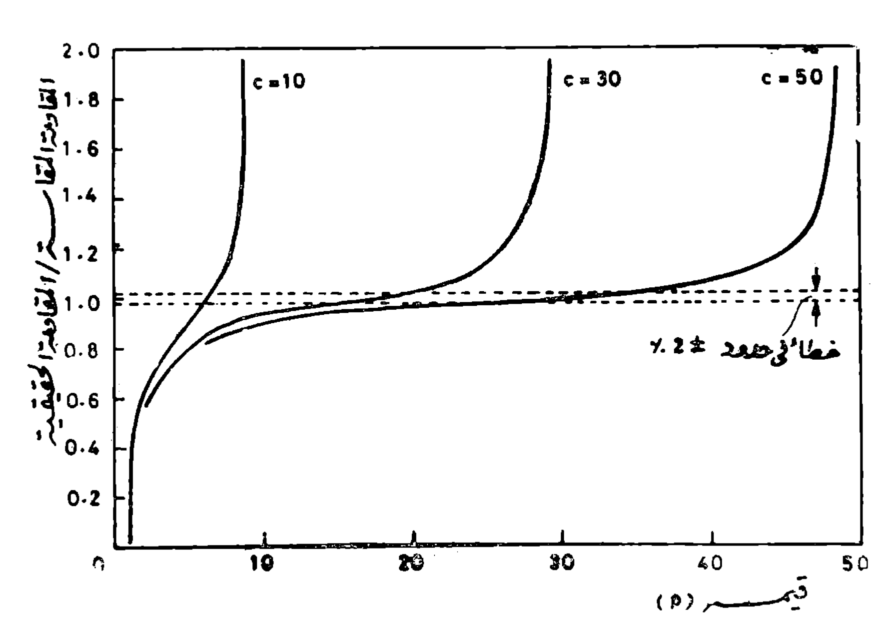
$$p = \tfrac{1}{2} c \left(\sqrt{5} - 1 \right) = 0.618 \ c$$

أى

$$H = 0.618 \ D \qquad (5 - 2)$$

وتدل هذه النتيجة على ان أيا كان البعد D بين الكترودى التيـــار ، فيمكن الحصول على المقاومة الحقيقية لالكترود التأريض عندما يكون البعد بينه وبيـــن الكترود الجهد P ‎61.8 % من المســافة D ٠

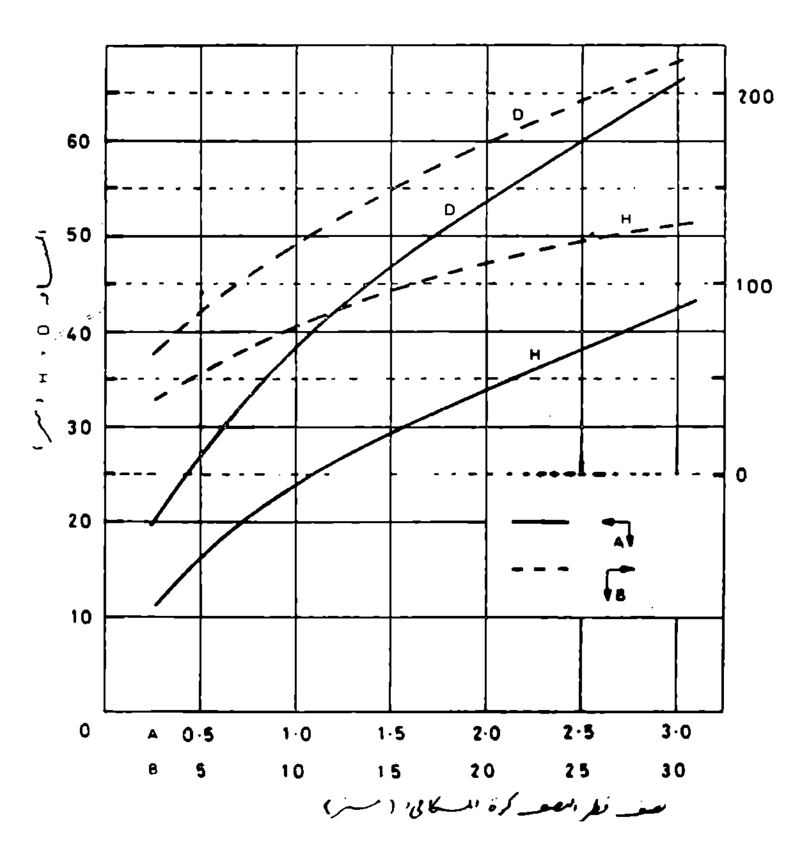
يمثل الشكل 2 - 5 الرسم البيانى للمعادلة (2-4) أى العلاقة بين الخطـأ الكسرى فى مقاومة الالكترود E وبين النسبة $p = H/a$ وذلك لقيم مختلفة للنسبة $c = D/a$ ومن الواضح أن كلماكبرت الكمية c كلما صغر الخطأ فــى قيمة المقاومة الفعلية للالكترود E نتيجة لأى خطأ فى تحديد المسافة $H = 0.618D$ وقد اتفق على ألا تزيد قيمة الخطأ فى المقاومة الفعلية عن $\pm 2\%$ ٠ ويبيــــن الشكل 2 - 6 العلاقة بين المسافتين H و D وبين نصف قطر الالكترود النصف



شكل 2 - 5 . الرسم البيانى للمعاولة (2 - 4)

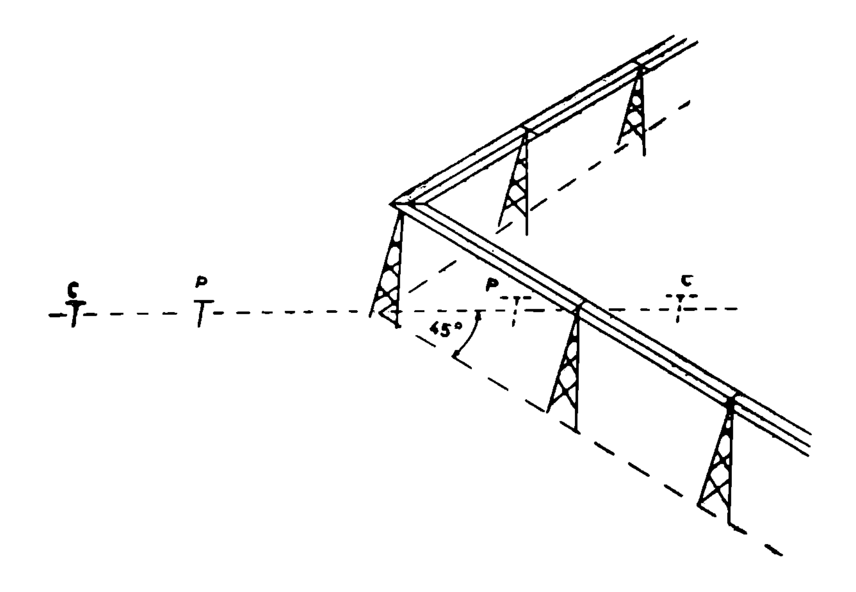
كـروى E ، أو نصف قطـر الالكترود النصف كـروى المكافىء للالكترود أو مجموعة من الالكترودات قد تكون على شكل قضبان أو ألواح الـخ (فقــرات 1.3 الى 4.3) ، بحيث يقع الخطأ فى حـدود $\pm$ 2%

وفى الحالات التى يتكون نظام التأريض من مجموعة من القضبان أو شبكة أرضية ، يجب وضع الالكترودات المساعدة خارج المساحة التى يقع فيها نظـام التأريض ، ويوضع الالكترود المساعد P على بعد لا يقل عن 5 أضـعاف طول أطول ضلع قطرى لهذه المساحة ، فى حين يوضع الالكترود المساعد C على بعد لا يقل عن 30 متر من P .



شكل 2 - 6 . تباعد الالكترودات المساعدة بحيث لا يزيد الخطأ فى قياس المقاومة للارض عن $\pm$2%

وعند قياس المقاومة للارض لأى برج من ابراج خط قوى هوائى يجب وضع الالكترودات المساعدة فى الاتجاه العمودى لاتجاه الخط (وذلك لتفادى أى خطأ ناتج عن الحث) • واذا كان البرج هو برج زاوية (شكل 2 - 7) فيجب وضع الالكترودات المساعدة على الخط المنصف للزاوية الخارجية • واذا تعذر ذلك فتوضع على الخط المنصف للزاوية الداخليــة •



شكل 2 - 7 . وضع الالكترودات لقياس المقاومة للارض لبرج زاوية

3.2 مقاوميـــة التربة

ان المقاومية الكهربية للتربة هى احدى العوامل الهامة التى تؤثر على قيمة المقاومة للارض لأى الكترود تأريض •

أن معظم الاتربة والصخور ليست موصلة للكهرباء فى حالة جفافها التام• ولكن اذا احتوت على كمية من الماء تنخفض مقاوميتها بكثير بحيث يمكن اعتبارها موصلة الا أن درجة توصيلها ضئيلة جدا اذا قورنت بتوصيل المعادن، فمثلا مقاومية النحاس النقى هى 0.016 ميكرو أوم ـ متر فى حين أن مقاومية

تربة عادية هى 100 أوم ـ متر ٠ *

وأهم العوامل التى تحـدد مقاومية التربة هـى ،

1 ـ نـوع التـربة

2 ـ محتـوى الرطـوبة

3 ـ نوع الاملاح المذابة ودرجة تركيزهـا

4 ـ درجـة الحـرارة والضـغط

5 ـ الحجم الحبيبـى

ويبين الجدول التالى الحدود التقريبية لمقاومية الانواع المختلفة من الاتربة :

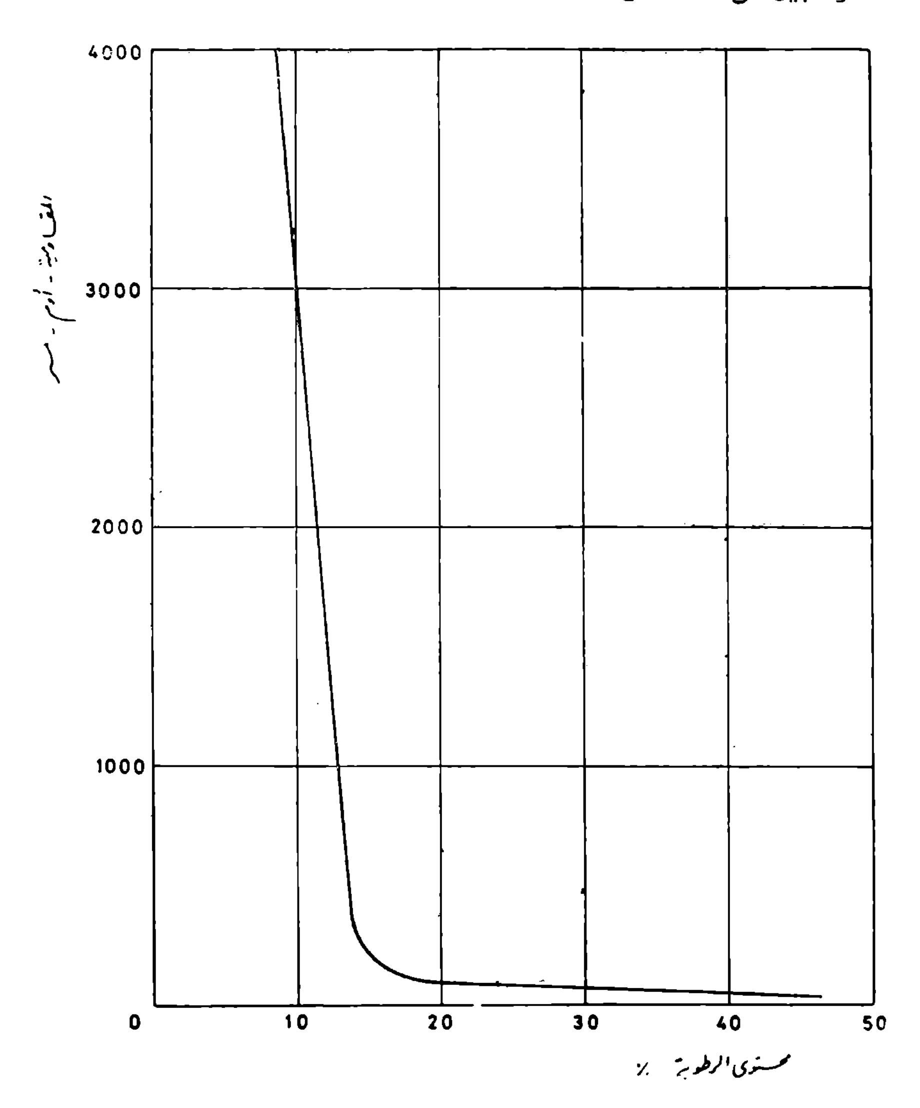
طفال رملى (مزيج من طين ورمل وقش)	5 — 50	أوم متر
طيـن	8 — 50	أوم متر
خليط من الطين الرملى والحصى	40 — 250	أوم متر
رمل وحصـى	60 — 100	أوم متر
حجر رملى واردواز	10 — 500	أوم متر
صخور بلورية	200 — 10,000	أوم متر

ومن أهم العوامل التى تحدد مقـاومية التربة هى كمية المـاء المحتجزة فى التربة (محتوى الرطوبة) ومقاومية هذا الماء نفسه وبالتالى كمية ونوع الاملاح المذابة فيه ٠ ومحتوى الرطوبة لأى تربة يتغير بتغير الطقس ، بتغير فصـول السنة ، بطبيعة التربة السفلية وعمق منسوب المـاء الجوفى ٠ ويندر أن تكون

* وحدة المقاومية بالاوم ـ متر تمثل مقاومة مكعب طول أضلاعه 1 متر٠ وجدير بالذكر أن 1 أوم ـ متر = 100 أوم ـ سم ٠

التربة جافة تماما الا فى الصحارى ، ولكن من النادر أيضا أن يزيد محتـوى الرطوبة عن 40% ، وهو يتراوح من حوالى 10% فى الفصـول الجـافة الى حوالى 35% فى الفصول الممطرة .

وتدل القياسات على أن قيمة المقاومية لا تتغير كثيرا اذا ازداد محتوى الرطوبة عن 20% أما اذا قل عن ذلك فالمقاومية تتغير تغيرا كبيرا جـدا كمـا هـو مبين فى الشـكل 2 - 8 .



شكل 2 - 8 . تغير مقاومية تربة طينية مع محتوى الرطوبة

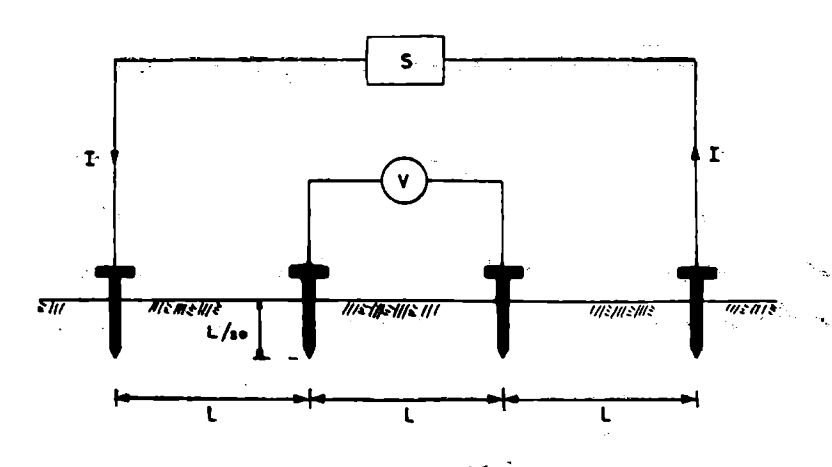
فمثلا اذا كان محتوى الرطوبة 10% نجد أن المقاومية 30 ضعف المقاومية عند محتوى رطوبة 20% . ونظرا لهذا التغير الكبير فان قياسات مقاومية التربة ، لغرض التأريض الكهربى ، يجب أن تتم فى فصل أو فترة الجفاف حيث أنها تمثل أسوأ الظروف بالنسبة للتأريض الكهربى .

وفى حالة تعذر قياس مقاومية التربة عند مكان ما ، يمكن الاسترشاد بالقيم المبينة فى الجدول التالى :

نوع التربة	المقاومية (أوم ـ متر)
تربة عضوية رطبة	10
تربة رطبة	100
تربة جافة	1000
تربة صخرية	10,000

4.2 قياس مقاومية التربة

ان أكثر الطرق استخداما لقياس مقاومية التربة هي طريقة فينر (*Wenner*) المبينة فى الشكل 2 - 9 .



شكل 2 - 9

تدق أربعة الكترودات على مستقيم واحد وعلى أبعاد متساوية ، ويمرر تيـــارا معلوما I من الالكترود 1 الى الالكترود 4 ويقاس فـرق الجهـد V بين الالكترودين 2 و 3 .

الجهد المطلق عند 2 نتيجة لدخول التيار عند $1 = I\rho/2\pi L$

الجهد المطلق عند 2 نتيجة لخروج التيـــار عند $4 = I\rho/4\pi L -$

اذا الجهد المطلق الكلى عند 2 هو ،

$$V_2 = I\rho/4\pi L$$

وبالمثل فالجهد المطلق الكلي عند 3 هـــو ،

$$V_3 = -I\rho/4\pi L$$

على ذلك فان فرق الجهد بين 2 و 3 هو ،

$$V_{23} = V_2 - V_3 = V = I\rho/2\pi L$$

ومقاومية التــــربة هــى ،

$$\rho = (V/I)\ 2\pi L = 2\pi LR \qquad (6-2)$$

وتمثل ρ المقاومية الحقيقية للتربة اذا كانت التربة متجانسة ، أما اذا كانت التربة غيرمتجانسةفتمثل ρ المقاومية الظاهريةللتربة (*apparent resistivity*)

وعند قياس مقاومية الارض عند أى موقع يستحسن أن تجرى عدة قياسات بقيم مختلفة للمسافة ما بين الالكترودات وذلك للتوصل الى القيمة المتوسطة للمقاومية ،وأىتغير فىالمقاومية مع التغير فىالمسافة بين الالكترودات يدل على عدم تجانس التربة وخاصة على تغير المقاومية مع العمق ،والسبب فى ذلك هو أن كلما ازدادتالمسافة بينالالكترودات كلما ازدادالعمق الذى يمر فيه التيـــار وقد جرى العرف أن فى هذه الحـــالات تمثل المقاومية الظـــاهرية المقـــاسة والالكترودات المتتالية على بعد L ، متوسط مقاومية التربة حتى عمق L .

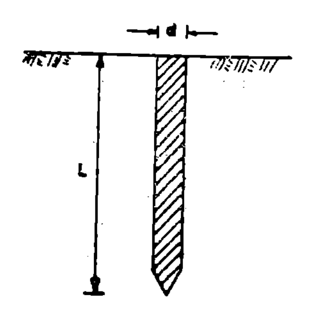
ورغم أن هذا الافتراض ليس دقيقا الا أنه مقبــول من الناحية العملية ٠ ويجب تسجيل تاريخ القياس وحالة التربة (جافة أو مبتلة) ودرجة الحرارة وكذلك أى بيانات عن وجود (أو الاشتباه فى وجود) أى موصــلات عارية مدفونة فى أرض الموقع حيث أن وجودها قد يؤثر على مسار التيار ، وبالتــالى على قيمة المقاوميــــــة ٠

الفصل الثالث

الكترودات التأريض

3 . 1 التأريض باستخدام الكترود واحد على شكل قضيب

رغم أن الالكترود النصف كروى هو أسهل شكل هندسى لحساب مقاومته للارض ، الا أن من الناحيــة العملية فالكترود التأريض الشــائع اســتخدامه (خاصة فى شبكات توزيع القوى) هو على شكل قضيب اسـطوانى مصمت (او ماســورة) يــدق عموديا فى الارض كمـا هــو مبين فى الشكل 3 - 1.



شكل 3 - 1

ويمكن ايجـاد قيمة المقـاومة المطــلقة لهـذا الالكترود بدقـــة كافيــة من المعادلة الآتية :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{3L}{d} \qquad (1 - 3)$$

حيث وحدات ρ هى أوم ـ متر ووحدات L و d هــى متر . ويمكننا ايجـاد

نصف قطر الالكترود النصف كروى المكافىء (أى الذى له نفس المقاومة للارض) اذا ساوينا المعادلتين (2 - 2) و (3 - 1) ،

$$a = L/ln\ (3L/d) \qquad (2-3)$$

ونتيجة لظهور قطر القضيب فى الحد اللوغارتمى من المعادلة (3 - 1) ، فان قيمة المقاومة لا تتغير كثيرا بالتغير فى قطر القضيب ولذا يمكننا أن نقول أن المقاومة تتناسب طرديا والمقاومية وعكسيا وطول القضيب ٠ وبالرجوع الى المعادلة (2-2) نرى أن مقاومة نصف الكرة تتناسب طرديا ومقاومية الارض وعكسيا ونصف القطر ٠ فاذا افترضنا أن مقاومية التربة زادت 100 مرة، نجد أن فى حالة القضيب يزداد حجم التجهيزات 100 مرة أيضا ، فى حين أن فى حالة النصف كرة يزداد هذا الحجم مليون مرة للحصول على نفس المقاومة للارض ٠ وهذه من أهم مميزات استخدام الكترود التأريض على شكل قضيب ٠

ويبين الجدول 3 - 1 تغير المقاومة مع الطول لقضيب قطره 2.5 سم وأيضا قيمة نصف قطر الالكترود النصف كروى المكافىء لكل طول ٠ وقد بينا فى العمود الاخير من هذا الجدول قيم المقاومة لقضيب نصف قطره 5 سم ٠ وبمقارنة هذه القيم بالقيم المبينة فى العمود الثانى نجد أن قطر القضيب ليس له أى تأثير ملموس على قيمة المقاومة ، ولذلك ، فمن الناحية العملية يتم اختيار قطر القضيب بحيث يتحمل دقه فى الارض بدون أن ينثنى أو يصاب بأى تلف ميكانيكي آخر ٠

وللتوصل الى القيمة المرغوب فيها للمقاومة للارض يمكن استخدام قضبان طويلة أو استخدام عدد من القضبان القصيرة وتوصيلها على التوازى ٠

جدول 3 - 1 تغير المقاومة للارض مع طول القضيب

طول القضيب L متر	مقاومة القضيب R أوم ($d=2.5$ سم)	نصف القطر المكافىء a متر	مقاومة القضيب R أوم ($d = 5$ سم)
1	0.76 ρ	0.21	0.65 ρ
2	0.44 ρ	0.36	0.38 ρ
4	0.25 ρ	0.64	0.22 ρ
8	0.137ρ	1.16	0.123ρ
16	0.075ρ	2.12	0.07 ρ
32	0.04 ρ	3.98	0,04 ρ

ويبين الشكل 3 -2 العلاقة بين طول قضيب قطره 2.5 سم ومقاومتــــه للارض على فرض أن مقاومية التربة 100 أوم ـ متر .

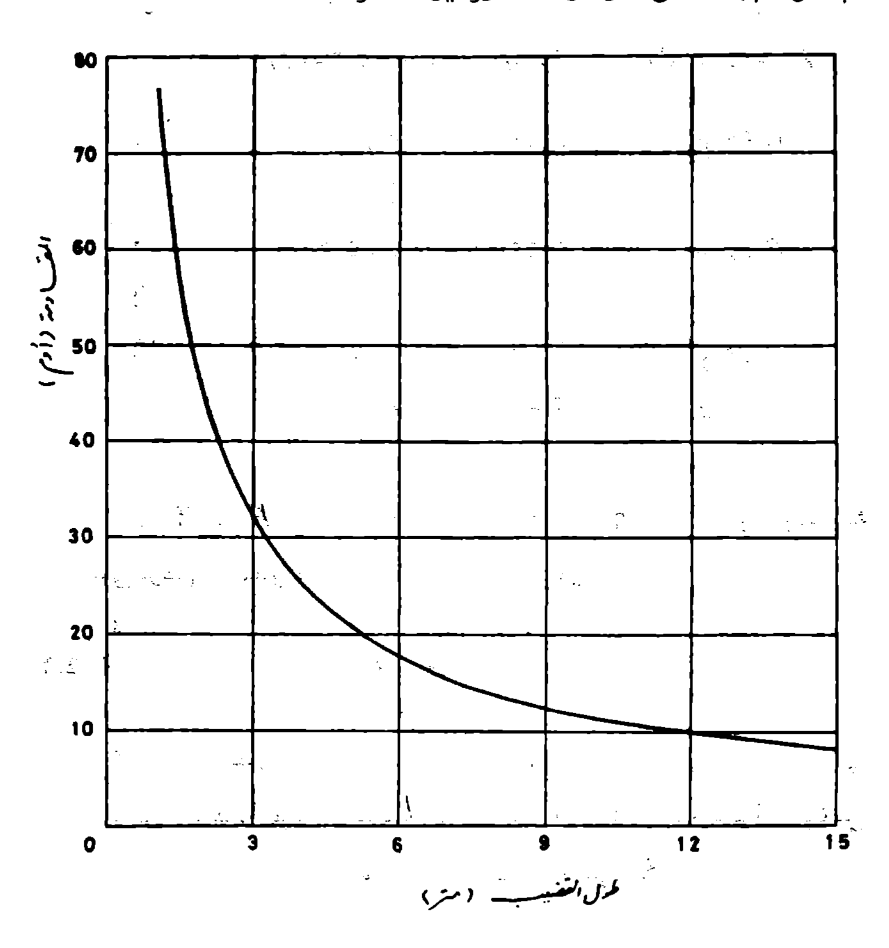
2.3 التاريض باستخدام قضبــان متعددة

فى كثير من الاحيان نجد أن مد طول القضيب وحده لا يكفى للتوصل الــى المقاومة للارض المرغوب فيها ، خاصة اذا كانت مقاومية التربة عالية • وفــى هذه الحالات يجب استخدام عدد من القضبان موصلة على التوازى •

وعند استخدام عدد من الالكتروداِت على التوازى فان المقاومــة للارض لا تنخفض بنسبة عدد هــذه الالكترودات الا اذا كانت المســافة بين كل الكترود والآخر ما لانهاية ، وحيث أن هذا غير عملى ، فيجب معرفة ماهو تأثير المسافة بين الالكترودات على نسبة الانخفاض فى مقاومة الالكترود الواحد • وسنكتفى هنا بحســاب هذه النسبة عند اســتخدام الكترودين •

فلنفرض أن الالكترودين متشابهين ، ان المسافة بينهما d ، وان نصــف

قطر الالكترود النصف كروى المكافئ هو a (شكل 3 - 3) · نظـرا لتماثل الشكل فكل الكترود سيحمل تيارا $1/_2 I$ للارض · وايماءا الى الفقرة 2 . 1 نجد أن الجهد المطلق لأى من الالكترودين هـــو ،



شكل 3 - 2

العلاقة بين طول القضيب ومقاومته للارض·قطر القضيب 2.5 سم ومقاومية التربة 100 أوم ـ متر

$$V = \frac{\rho}{2\pi}\left[\frac{1}{a} - \frac{1}{d}\right] \tfrac{1}{2} I$$

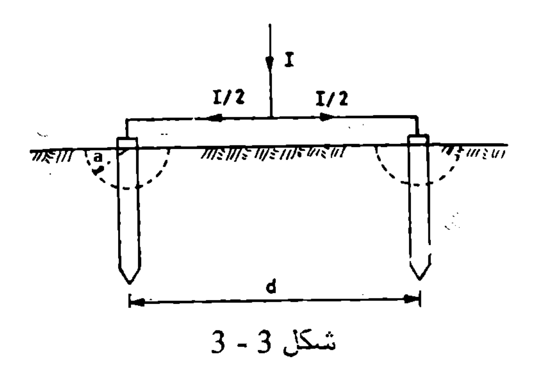
والمقــاومة الكلية للارض للاكترودين على التوازى هـى اذا

$$R = V/I = \tfrac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2\pi a}\left[1 + (a/d)\right]$$

واذا رمزنا للنسبة a/d بـ α ،

$$\frac{\text{مقاومة قضيبين على التوازى}}{\text{مقاومة قضيب واحد}} = \tfrac{1}{2}(1 + \alpha) \qquad (3-3)$$

وسوف نشير الى هذه النسبة بنسبة المقاومة • ومن الواضح أن هذه النسبة لا تساوى 0.5 الا اذا كانت d مالا نهاية • ويبين الجدول (3 - 2) نسبة المقاومة لبعض التشكيلات المختلفة •



شكل 3 - 3

جدول 3 - 2 نسبة المقاومة لبعض التشكيلات المختلفة لقضبان التأريض

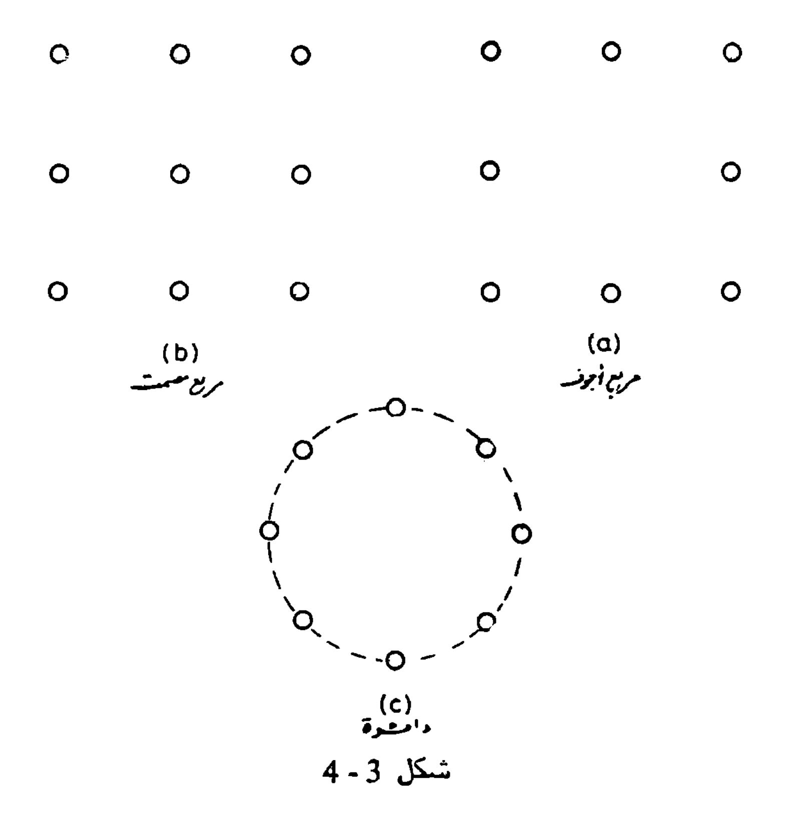
التشكيل	نسبة المقاومة
ثلاثة قضبان على مستقيم واحد	$(2 + \alpha - 4\alpha^2)/(6 - 7\alpha)$
ثلاثة قضبان على شكل مثلث متساوى الاضلاع	$(1 + 2\alpha)/3$
أربعة قضبان على مستقيم واحد	$(12 + 16\alpha - 21\alpha^2)/(48 - 40\alpha)$

وعندما يزداد عدد القضبان اللازمة للحصول على قيمة المقاومة الارضية المرغوب فيها ، فأكثر التشكيلات استخداما هى الآتية (شكل 3 - 4) :

1 - توزيع القضبان على شكل مربع أجوف (*hollow square*) كما هو مبين فى الشكل 3 - 4 *(a)* واذا كان عـدد القضـبان فى كل ضـلع هو n ، فالعدد الكلى للقضبان هو $4n - 4$.

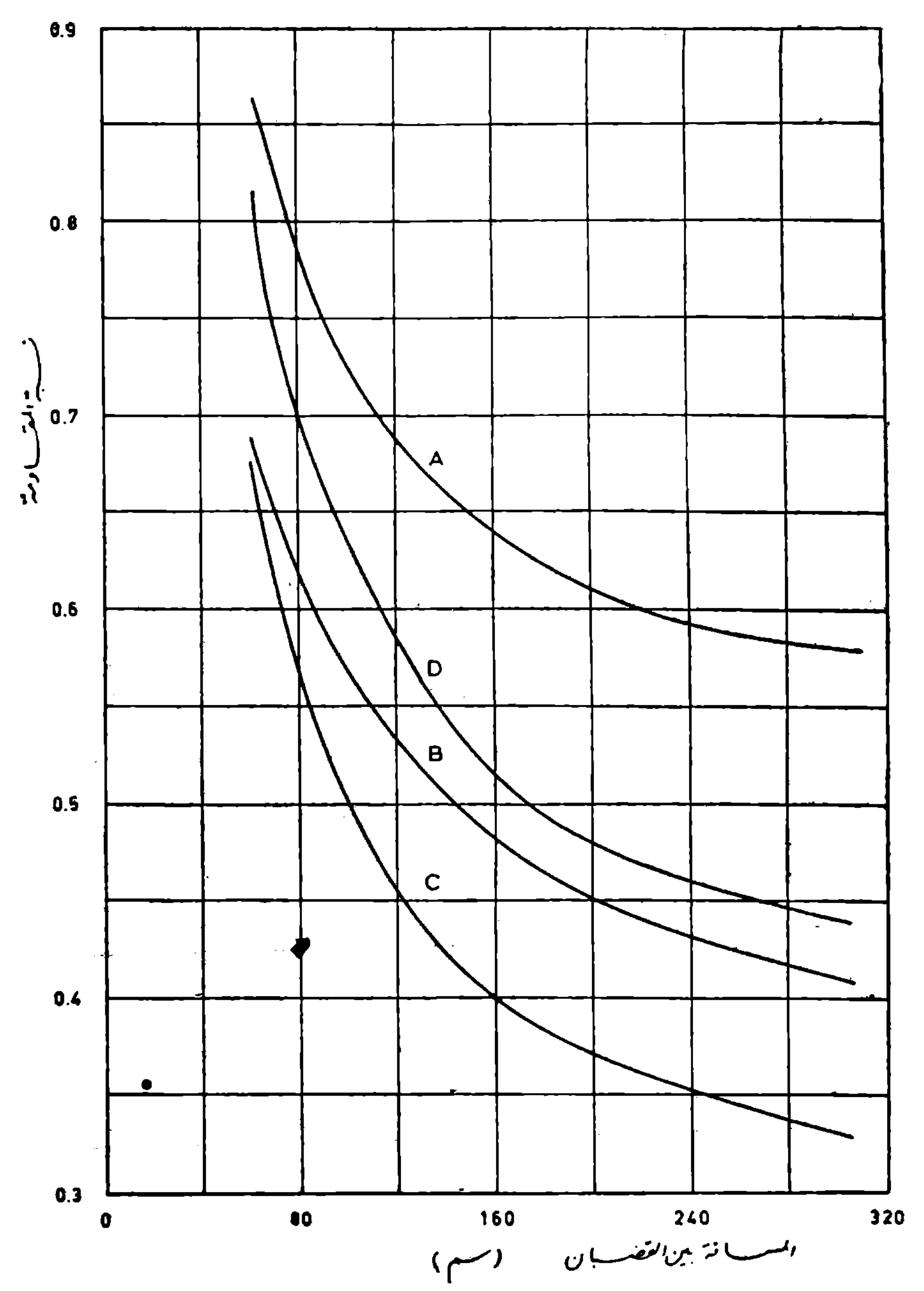
2 - توزيع القضبان على شكل مربع مصمت (*solid square*) كما هـو مبين فى الشكل 3 - 4 *(b)* .

3 - توزيع القضبان على محيط دائرى كما هو مبين فى الشكل 3 - 4 *(c)*



شكل 3 - 4

ويبين الشكل 3 - 5 عددا من المنحنيات التى يمكن من خلالها ايجاد نسبة المقاومة للتشكيلات المذكورة أعلاه ٠ وجدير بالذكر أنه وجد أن هذه النسـبة النظرية هى دائما من 5 الى 20 % أعلى من النسبة المقاسة عمليـا ولذلك فانها دائما جانحة ناحية الأمـان ٠



شكل 3 - 5

العلاقة بين نسبة المقاومة والمسافة بين القضبان لعدة تشكيلات

A - قضيبان على مستقيم واحد

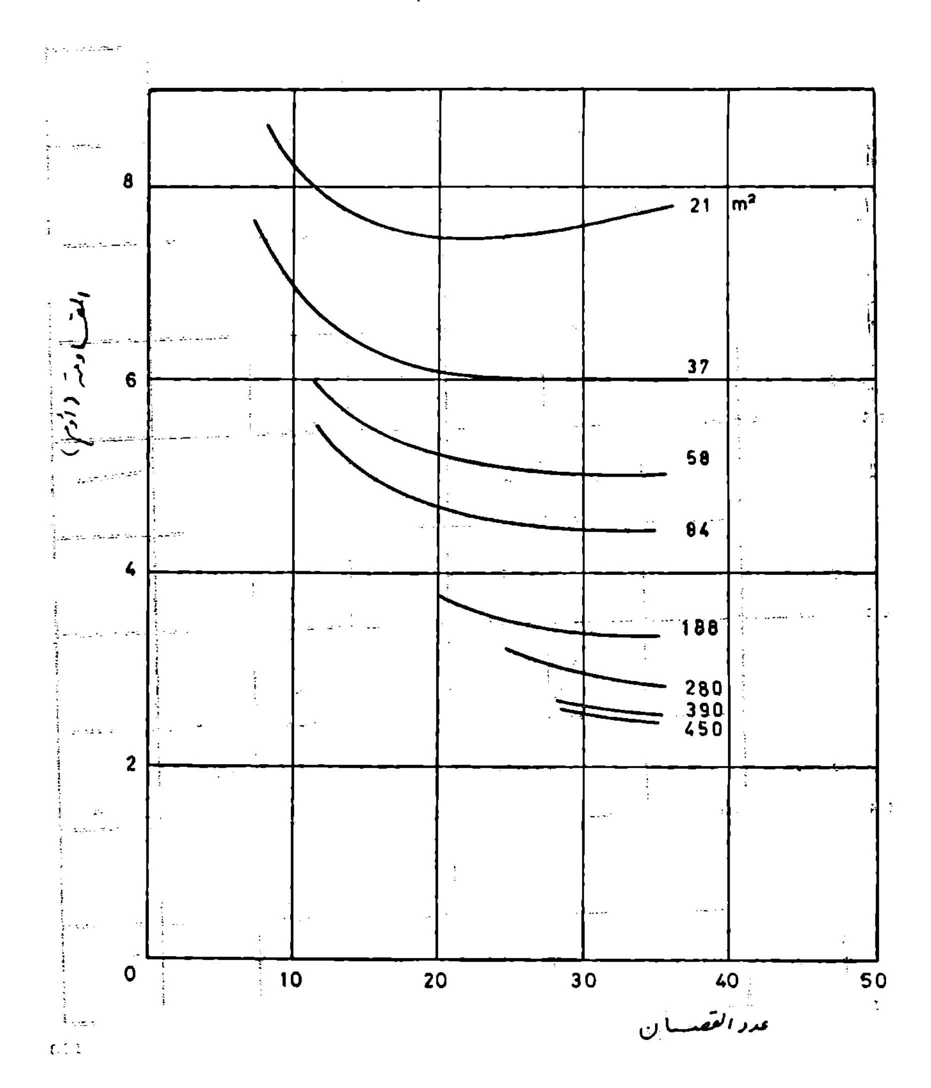
B - ثلاثة قضبان على مستقيم واحد

C - اربعة قضبان على مستقيم واحد

D - ثلاثة قضبان على شكل مثلث متساوى الاضلاع

(طول كل قضيب 2.4 متر ، وقطره 2.5 سم ومقاومية التربة 100 أوم – متر)

وفى كثير من الحالات تكون المساحة المتاحة لغرض التأريض محدودة ، ففى هذه الحالات يجدر بنا أن نعرف ما هو عدد وتشكيل القضبان الذى يؤدى الى أمثل استخدام للمســاحة للتوصل الى نظام تأريض فعــال ٠



شكل 3 - 6

المقاومة للارض لقضبان موزعة على شكل مربع أجوف له مساحة محددة ٠ كل قضيب طوله 2.5 متر وقطره 2.5 سم ومقاومية الارض 100 أوم - متر

يبين الشكل 3 - 6 العلاقة بين المقاومة للارض وبين عدد القضبان اللازمة للحصــول على هذه المقاومــة ، وذلك بالنسبة لمساحــات مختلفة ، وتوزيــع الالكترودات على شكل مربع أجوف؛وقد افترض أن كل قضيب طوله 2.5 متر وقطره 2.5 سم وأن مقاومية الارض 100 أوم – متر • ويوضح هذا الشكل أن هناك حدا أدنى للمقاومة التى يمكن الحصول عليها داخل مساحة معينة ، وأيضا حدا اقتصاديا لعدد القضبان اللازمة للحصول على هذه المقاومة • وعلى سبيل المثال ، اذا كانت المساحة 36 مترا مربعا نجد أن الحد الادنى للمقاومة هو 6 أوم وأن العدد الاقتصادى للقضبان هو 16 • واذا أردنا التوصل الى مقاومة أصغر من 6 أوم فيجب استخدام مساحة أكبر للتأريض• أما اذا كانت مقاومية الارض 2000 أوم – متر بدلا من 100 أوم – متر فالحدالادنىللمقاومةيصبح 120 أوم (2000/100 × 6) بدلا من 6 أوم •

ويبين الشكل 3 - 7 العلاقة بين المساحة وبين الحد الادنى للمقاومة فى حالة توزيع القضبان على شكل مربع أجوف وفى حالة توزيعها على شكل مربع مصمت • ومن الواضح أنه اذا كانت المساحة محدودة فان اضافة قضبان داخــل المربع الاجوف لا يؤدى الا الى انخفاض ضئيل فى المقاومة مما يجعل اضــافة مثل هذه القضبان غير اقتصــــادى •

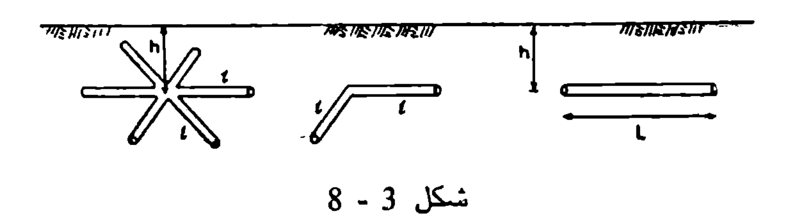
3 - 3 التأريض باســتخدام أسلاك مدفونة أفقيــا

اذا كانت طبيعة الارض صخرية أو اذا تواجدت طبقة صخرية بقرب سطح الارض بحيث يصعب استخدام الكترود على شكل قضيب ، ففى هذه الحالات يتكون الكترود التأريض من سلك مدفون افقيا بقرب سطح الارض (على عمق يتراوح بين 0.5 و 1.0 متر)• ويأخذ هذا السلك أشكالا مختلفة: فقد يكون على

شكل مستقيم أو على شكل زاوية قائمة أو على شكل نجمة متعــددة الاذرع (شكل 3 - 8).

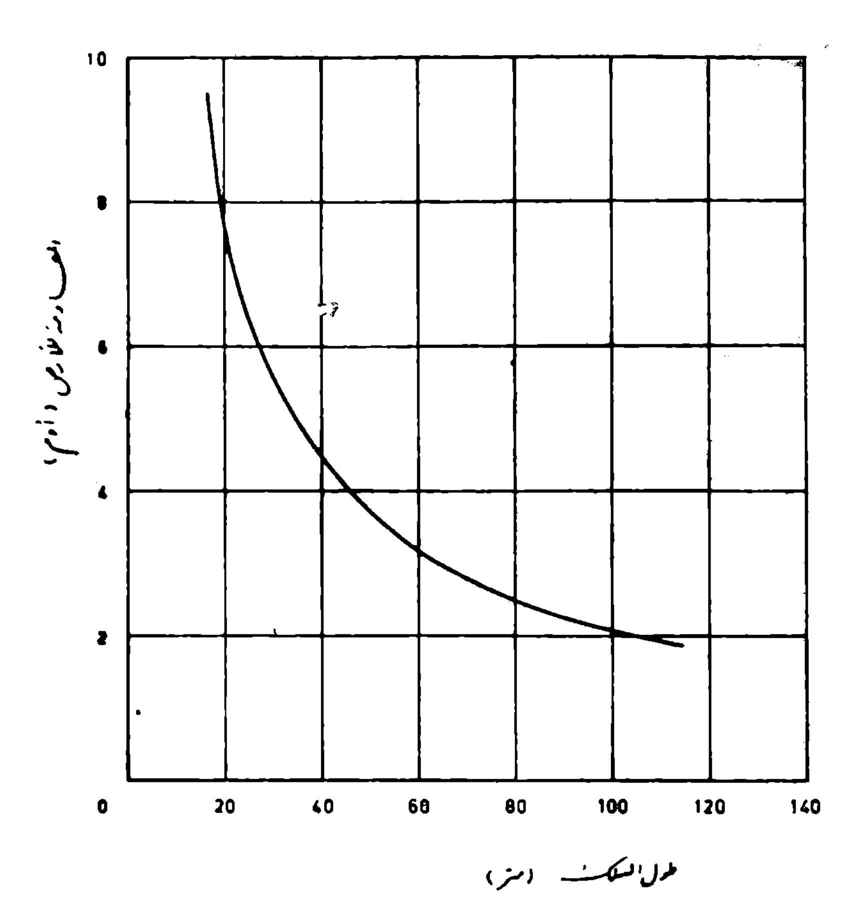
شكل 3 - 7

الحد الادنى للمقاومة للارض فى حالة توزيع قضبان طولها 2.5 متر وقطرها 2.5 سم داخل مساحة محددة • مقاومية التربة 100 أوم ـ متر



شكل 3 - 8

ويبين الشكل 3 - 9 تغـــير المقــــاومة مع الطول لسلك مستقيم مدفــون افقيا • ويلاحظ أنه اذا زاد طول السلك عن 90 متر فان معدل انخفاض المقاومة مع الزيادة فى الطول يصبح صـغيرا جــدا •



شكل 3 - 9

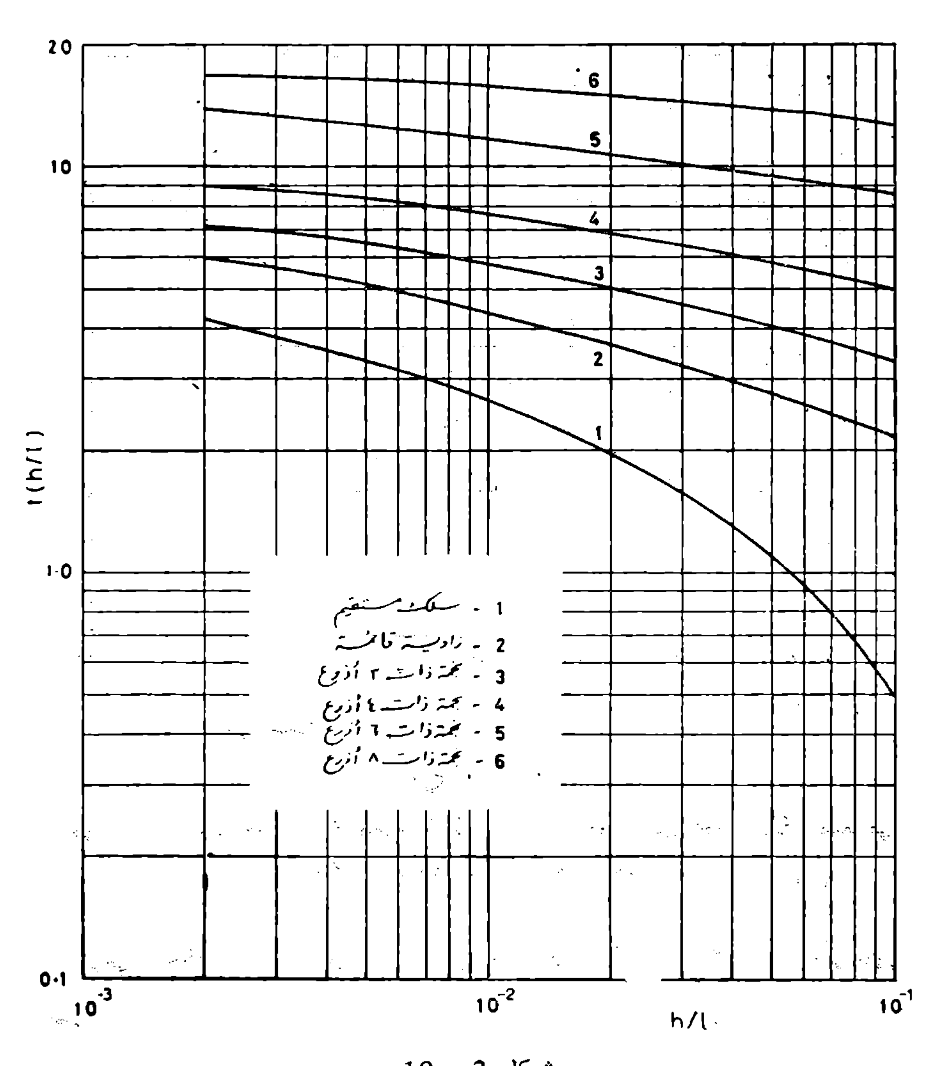
تغير المقاومة مع طول سلك قطره 2.5 سم ومدفون على عمق 60 سم فى تربة مقاوميتها 100 أوم – متر

وفى الحالة العامة اذا فرضنا أن L هو الطول الكلى للسلك ، l هـو طول الذراع الواحد ، d هو قطر السلك و h هو عمق السلك من سطح الارض ، فيمكن ايجاد قيمة المقاومة للارض من المعادلة الآتيـــة :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln (l/d) + f(h/l)\right] \qquad (4-3)$$

حيث $f(h/l)$ هى دالة من النسبة h/l تختلف قيمتها عـلى حسب تشـكيل

السلك · ويمكن ايجاد قيمة هذه الدالة من المنحنيات المبينة فى الشكل 3-10 لستة تشكيلات مختلفة ·



شكل 3 - 10

تغير الدالة $f(h/l)$ مع النسبة (h/l) لاشكال مختلفة من الكترودات التأريض

واذا فرضنا أن $L = 150$ متر ، $d = 2.5$ سم ، $h = 90$ سم و $\rho = 100$ أوم ـ متر نجد أن مقاومة التشكيلات المختلفة هى كالآتى :

ســلك مستقيم	... ...	1.21 أوم
زاوية قــائمة	... ...	1.24
نجمة ذات ٣ أذرع	... ...	1.29
نجمة ذات ٤ أذرع	... ...	1.42
نجمة ذات ٦ أذرع	... ...	1.75
نجمة ذات ٨ أذرع	... ...	2.25

ونرى من هذه النتيجة أن اذا كان طول السلك محدد فالسلك المستقيم هو الذى يعطى أقل مقاومة ٠ أما اذا افترضنا أن لدينا مساحة نصف قطرها 30 متــر ، فلنفس القيم السابقة لكل من d ، h ، م يبين الجدول 3 - 3 المقاومة وأطوال الاذرع والطول الكلى للسلك بالنسبة للتشكيلات المختلفة ٠

جدول 3 - 3 المقاومة للارض للتشكيلات المختلفة لسلك قطره 2.5 سم مدفون على عمق 90 سم فى مساحة قطرها 60 متر ومقاوميتها 100أوم ــ متر

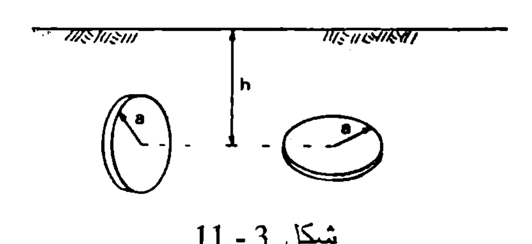
التشكيل	المقاومة (أوم)	أطوال الاذرع (متر)	الطول الكلى للسلك (متر)
سلك مستقيم	2.9	60	60
زاوية حادة	2.25	43	86
نجمة ذات ٣ أذرع	2.2	30	90
نجمة ذات ٤ أذرع	1.9	30	120
نجمة ذات ٦ أذرع	1.6	30	180
نجمة ذات ٨ أذرع	1.44	30	240

ويتضح من هذا الجدول أن المقاومة للارض لنجمة لها ثمانية أذرع هى نصف مقاومة السلك المستقيم ولكنها تحتاج الى أربعة أضعاف كمية السلك ٠ ونظرا للزيادة الكبيرة جدا فى طول السلك اللازمة لتحقيق تخفيض طفيف فى قيمــة المقاومة ، فمن الناحية العملية لا تستخدم أكثر من ثلاثة أو أربعة أذرع ٠

4.3 الالواح المدفونة كالكترودات تاريض ٠

فى الماضى كانت الالواح المدفونة تستخدم بكثرة كالكترودات تأريض ولكن انخفاض كفاءة استخدام المعدن (أى كمية المعدن المطلوبة للحصول على قيمة معينة للمقاومة) بالنسبة للقضبان أو الاسلاك المدفونة يجعل استخدامها غير اقتصادى ٠

ويمكن ايجاد المقاومة للارض للوح دائرى نصف قطره a متر ومركزه على عمق h متر من سطح الارض ، ومدفون أما افقيا أو رأسيا (شكل 3 - 11) من المعادلة الآتية :



شكل 3 - 11

$$R = \frac{\rho}{8a}\left[1 + a/(2.5h + a)\right] \qquad (5 - 3)$$

وللاعماق الكبيرة

$$R = \rho/8a \qquad (6 - 3)$$

وجدير بالذكر أن سمك اللوح ليس له أثرا يذكر على المقاومة ٠

5.3 استخدام مواسير الماء أو الغاز أو حديد التسليح كالكترودات تأريض

فى بعض الاحيان يمكن استخدام المواسير المعدنية لشبكة الماء أو الغاز كالكترود التأريض ، ولكن قبل اتخاذ هذا القرار يجب قياس مقاومتها للارض ويجب أيضا التأكد من الاستمرارية الكهربية لجميع الوصل (باستخدام

وصلات تخطى) وضمان هذه الاستمرارية بعد اجراء أى أعمال تصليح أو صيانة ويجب أيضا ضمان عدم التبديل المستمر لأجزاء من المواسير المعدنية بمواسير مصنوعة من المواد اللدنة الاصطناعية (بلاستيك) · وفى حالة عدم امكانية الالتزام بهذه الضمانات يجب صرف النظر عن هذه الطريقة للتأريض ·

وفى المبانى التي يستخدم فيها حديد التسليح فى الاساسات الخرسانية مثل قواعد الاعمدة يمكن استخدام قضبان التسليح كالكترودات تأريض حيث أن مقاومية الخرسانة عندما تكون تحت سطح الارض تصل الى حوالى 30 أوم ـ متر أى أقل من القيمة المتوسطة لمقاومية التربة نفسها (100 أوم ـ متر) · وفى هذه الحالة يكفى عمل توصيلات مناسبة بين أى قضيب تسليح أساسى فى كل قاعدة وبين موصل الارض العمومى عند لوحة التوزيع ·

6.3 مساحة المقاومة *(Resistance Area)*

يبين الشكل 2 - 2 أنه كلما ازدادت المسافة من الكترود التأريض كلما ازدادت النسبة بين قيمة المقاومة المحصورة داخل هذه المسافة وبين المقاومة الكلية (المطلقة) للالكترود · ومن الواضح أن معدل هذه الزيادة هو معدل متناقص · ومن الناحية النظرية لا يمكن حصر المقاومة الكلية الا اذا كانت المسافة ما لا نهاية · أما من الناحية العملية ، فهناك حجم محدود من الارض يحيط بالالكترود ويحتوى على «الجزء الاعظم» من المقاومة · وقد اتفق على أن يكون هذا الجزء الاعظم هو 98 % من المقاومة الكلية ·

لقد رأينا من المعادلة (2 - 1) أن المقاومة بين نصف كرة نصف قطرها a متر وبين أى نقطة على بعد r متر من مركزها هى

$$R = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{r}\right)$$

ونسبة المقاومة المحصورة حتى هذا البعد هى ،

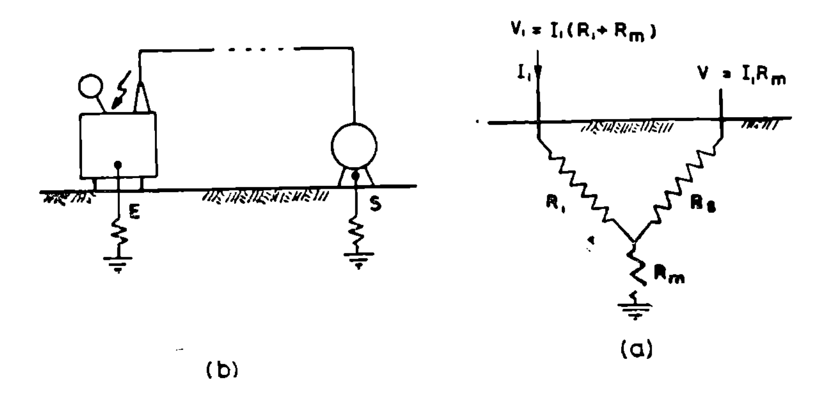
$$1-\frac{a}{r}$$

واذا افترضنا أن النسبة المئوية هى x نجد أن

$$r = \frac{100\,a}{100 - x} \qquad (7 - 3)$$

واذا كان الكترود التأريض عبارة عن قضيب طوله 2.5 متر (وهو أقل طول مسموح به للقضبان) ونصف قطره 2.5 سم ، فنصف قطر الالكترود النصف كروى المكافىء هو 43.2 سم ونجد أن نصف قطر مساحة المقاومة هو

$$r = 43.2/(100 - 98) = 21.6 \text{ متر}$$



شكل 3 - 12

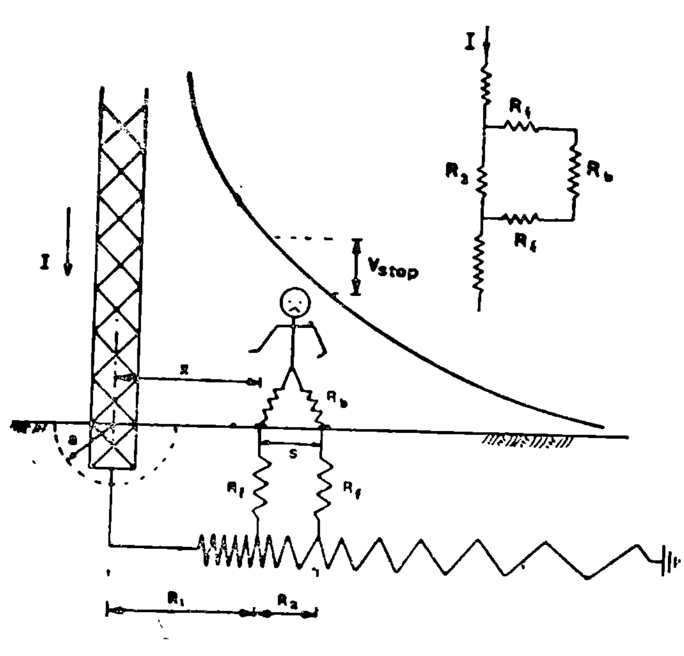
ولذلك اذا أردنا الفصل الفعلى بين الكترودى تأريض فيجب أن يبعدا عن بعضهما مسافة لا تقل عن 20 متر·أما اذا قلتعن ذلك فيحدث تداخللساحتى المقاومه · ومعنى ذلك هو ظهور مقاومة متبادلة بين نقطتى التأريض (شكل $12a$ - 3) · ويمكن توضيح ذلك بالرجوع الى الشكل 3 - $12\,b$ ؛ فعند حدوث قصر بين أحد الاوجه وجسم المحول يرتفع جهد النقطة E الى مقـــدار يتوقف على قيمة المقاومة للارض عند E وعلى حجم تيار القصر،فى حينيرتفع جهد النقطة S (وبالتالى جهد الجسم المؤرض عن طريق S) الى قدر تحدده قيمة المقاومة المتبادلة بين النقطتين S و E ؛ وتزداد هذه المقاومة كلما تقـــاربت النقطتـــان ·

الباب الرابع

جهـد الخطوة وجهـــد اللمس

1.4 جهـد الخطـــوة

لقد ذكرنا فى الفقرة 4.1 أننا سوف نعتبر أن مقاومة جسم الانســـان بين الاطراف هى 1000 أوم · فلنفـرض أن شخصـــا على بعد x متر من الكترود الارض يخطو خطوة طولها s متر فى نفس لحظـــة مرور تيار I الى الارض·فاذا كان نصف قطر الالكترود النصفكروى المكافىء لالكترود التأريض هو a متر ، فان المقاومة R_2 (شكل 4 - 1) المحصورة بين النقطتين التى تمثلا مكان قدمى الرجل هى ،



شكل 4 - 1 . جهـــد الخطـــوة

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+s}\right)$$

وفرق الجهد بين هاتين النقطتين يمثل «جهد الخطوة» ، وهو

$$V_s = I\ R_2 = \frac{I\ \rho}{2\pi} \cdot \frac{s}{x\ (x+s)}$$

ومن الواضح أن القيمة العظمى لهذا الجهد هى عند $x = a$. واذا فرضنا أن طول الخطوة s هو متر واحد ، فاقصى قيمة لجهد الخطوة هى

$$V_s\ (max) = \frac{I\ \rho}{2\ \pi} \cdot \frac{1}{a(a+1)}$$

واذا فرضنا أن مقاومة الجسم هى R_b وأن المقاومة بين كل قدم والارض هى R_f ، فان التيار المار فى الجسم هو

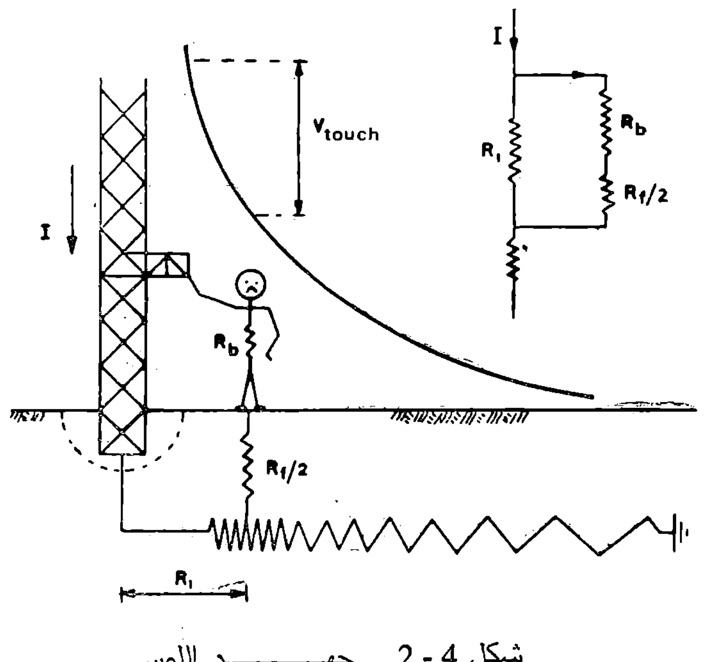
$$I_b = V_s / (R_b + 2\ R_f)$$

وحيث أن التيار المار فى جسم الانسان يجب الا يزيد عن $0.116/\sqrt{t}$ (انظر الفقرة 3.1) ، فان جهد الخطوة المأمون ، وهو أقصى جهد خطوة مسموح به ، هو

$$V_s(max) = I_b(R_b + 2\ R_f) = (1000 + 2\ R_f)\ 0.116/\sqrt{t} \qquad (1-4)$$

2.4 جهد اللمس

اذا لمس أى شخص جسما معدنيا متصلا مباشرة بالارض فى نفس لحظة مرور تيار قصر للارض ، فان حجم التيار الذى يمر بين يده وقدميه يحدد مايسمى بـ «جهد اللمس» فاذا اعتبرنا أن الشخص على بعد متر واحد من الجسم الذى يلمسه ، فان جهد اللمس الفعلى هو (شكل 4 - 2) ،



شكل 4 - 2 . جهـــــــــــد اللمس

$$V_t = I R_1 = I_b \left(R_b + \tfrac{1}{2} R_f\right)$$

حيث

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - 1\right)$$

وبالتعويض بـ $I_b = 0.116/\sqrt{t}$ و $R_b = 1000$ أوم نجد أن جهـد اللمس المأمون وهو أقصى جهد لمس مسموح به ، هو

$$V_t\ (max) = \left(1000 + \tfrac{1}{2} R_f\right) 0.116/\sqrt{t} \qquad (2 - 4)$$

ويتضح من المعادلتين (4 - 1) ، (4 - 2) أن قيمة المقاومة بين القدم والارض R_f تؤثر تأثيرا كبيرا على القيمة المسموح بها لكل من جهد الخطوة وجهد اللمس · ومن الناحية العملية يمكن اعتبـــــار أن القدم مكافىء لالكترود

دائرى نصف قطره حوالى 8 سم ؛ والمقاومة للارض لهذا الالكترود هى (من المعادلة 3 - 5 عندما $h = 0$) ،

$$R_f = \frac{\rho_s}{4a} = \frac{\rho_s}{4 \times 0.8} \simeq 3\ \rho_s$$

حيث تمثل ρ_s مقامية التربة القـــريبة من سطح الارض • وبالتعويض عن هذه القيمة لـ R_f فى المعادلتين (4 - 1) ، (4 - 2) نجد أن :

أقصى جهد خطوة مسموح به هو

$$V_s\ (max) = (116 + 0.7\ \rho_s)\ /\sqrt{t} \qquad (3 - 4)$$

وأقصى جهد لمس مسموح به هو

$$V_t(max) = (116 + 0.17\rho_s)\ /\sqrt{t} \qquad (4 - 4)$$

نرى من المعادلتين السابقتين أن لاى قيمة محددة لزمن دوام التيار ، كلما زادت قيمة المقاومية السطحية للارض كلما ازدادت قيمة جهد الخطوة وجهداللمس المسموح بهما • ويمكن زيادة قيمة المقاومية السطحية عن طريق تغطية السطح بطبقة من الصخر المهصر *(crushed)* ، يتراوح سمكها بين 10 و 15 سم•

واذا أهملنا المقاومة بين القدم والارض وافترضنا أن $t = 3$ ث ، نجد أن الحد الاقصى لجهد الخطوة أو اللمس هو 67 فولت •

الفصل الخامس

نظـــــام التـــأريض

1.5 قيمة المقــاومة للارض

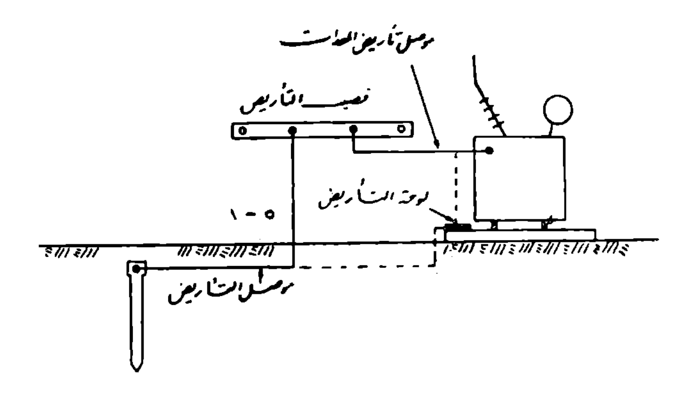
ان القيمة المثالية للمقاومة للارض هى صفر ولا يمكن التوصل اليها عمليــا ٠ ولكن يمكن التوصل الى قيم أصغر من أوم واحد ٠ الا أن هذه القيم المنخفضة ليست ضرورية فى كثير من الحالات ٠ فمن وجه عام فان قيمة المقــاومة اللازمة تتناسب عكسيا وحجم تيار القصر للارض ، فكلما كبر هـــذا التيار وجب أن تصغر المقاومة ٠ وحيث أن مفاعلة الكابلات أصغر من مفاعلة الخطوط الهــوائية نجد أن تيارات القصر اكبر فى الكابلات عنها فى الخطــوط الهــوائية ٠ ولذلك يجب أن تكون المقاومة للارض أصغر للمنشآت المغذاة مباشرة عن طريق الكابلات عن المنشآت المغذاة مباشرة عن طريق خط هوائى ٠

بالنسبة لمحطات التوليد ومحطات التحويل الكبيرة يجب الا تزيد قيمةالمقاومة للارضعنأوم واحد٠أما بالنسبة لمحطات التحويل الصغيرة والمنشآت الصناعية فيستحسن أن تكون المقاومة أقل من 5 أوم ٠

وجدير بالذكر أنه يرد فى كثير من المواصفات القياسية للدول المختلفة القيم القصوىالمسموحبها للمقاومةللارض٠فمثلاتشترط المواصفاتالقياسية الامريكية (*National Electrical Safety Code*, 1977) الاتزيدقيمةالمقاومةعن 25 أوم فى حين أن المواصفات القياسية الالمانية (*VDE* 0100) تشترط الا تزيـــد المقاومة عن 5 أوم ٠

2.5 مكونات نظام التأريض

يتكون اى نظام تاريض بصفة عامة من العناصر الآتية (شكل 5 - 1) :



شكل 5 - 1 . مكونات نظـام التأريض

1 - مساحة أرض تكون مناسبة من حيث مقاومية التربة وامكانية وضـــع الكترودات التأريض ٠

2 - الكترودات التأريض ٠

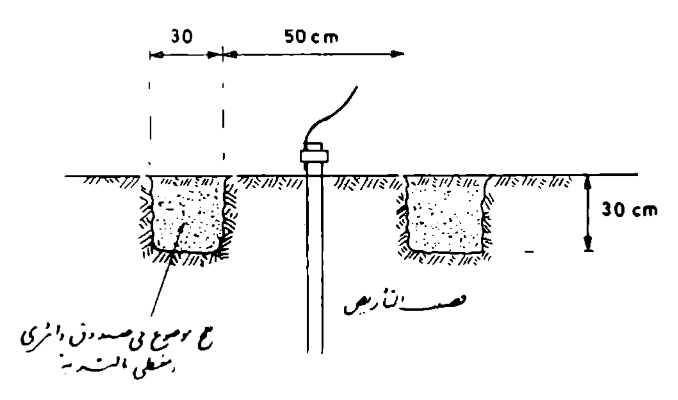
3 - موصلات التأريض (*grounding conductors*) وهى الموصلات التى تستخدم كتوصيـــــلات بين الالكترودات وبعضها وبين الالـــكترودات والتجهيزات الخاصة بتوصيلة الارض أو مباشرة بالمعدات أو التجهيزات المراد تأريضها ٠

4 - تجهيزات خاصة بتوصيلة الارض (*ground connection provisions*). بالنسبة للمنشآت الصغيرة يمكن مد موصلات التأريض مباشرة بين الكترود التأريض والمعدات المراد تأريضها ٠ أما بالنسبة للمنشآت الكبيرة فيفضل تأمين تجهيزات خاصة تحتوى على نهايات مناسبة لموصـــلات التأريض ولتوصيلات تأريض المعدات ٠ ويجب اقامة هذه التجهـــيزات على الجدران الانشائية أو عـــلى الاساسات فى أماكن يسهل الوصول إليها ٠

5 - توصيلات تأريض المعدات (*equipment grounding connections*) وهى عبارة عن التوصيلات بين المعدات المراد تأريضها وتجهيزات التوصيـــل الخاصة المشار اليها أعلاه ٠

1.2.5 مساحة الارض

يجبأن تكونالارض مناسبة من حيث مقاومية التربة وامكانية وضع الكترودات التأريض • واذا كانت مقاومية التربة عالية والمساحة محدودة ودق الالكترودات الى أعماق كبيرة غير ممكن لوجود طبقات سفلية صخرية ، ففى هذه الحـــالة يمكن علاج التربة المحيطة بالالكترودات كيمائيا لتقليل مقاومية التربة • ويتم ذلك باستخدام اما ملح كبريتات المغنسيوم أو ملح كلوريد الصوديوم (الملح العادى)• ورغم أن كبريتات المغنسيوم أفضل من حيث التحات الكيمائى الا أن كلوريد الصوديوم أرخص بكثير ويفى بالغرض جيدا اذا وضع فى خندق يحيط بالالكترود كما هو مبين فى الشكل 5 - 2 .



شكل 5 - 2

ومن الواضح أن هذه الطريقة لتقليل مقاومية الارض هى طريقة مؤقتة نظرا لاختفاء الملح تدريجيا بسبب سقوط الامطار والصرف الطبيعى • ولـذلك يجب تجديد شحنة الملح كل عامين أو أكثر ، على حسب كمية المطر ومسامية الارض• واذا كان عنصر المتابعة والصيانة غير متوفر ، فيفضل عدم استخدام هذهالطريقة مهما كانت اقتصادية •

2.2.5 الكترودات التأريض

بما أن نوع معدن الالكترود لا يؤثر على مقاومته للارض ، فان اختيار المعدن

يعتمد كلية على مدى مقـــاومته للتآكل فى نـــوع التربة التى سيوضـــع فيها • ولقد أثبتت التجربة العملية الطويلة والتجارب المعملية أن النحاس هــو أفضل المعادن التى يمكن استخدامها فى التأريض • وبما أن الالكترود الاكـثر استخداما للتأريض هو القضيب المدقوق *driven rod* فان أنسب نــوع من هذه القضبان هو المصنوع من الصلب المغلف بالنحاس* *copper - clad steel* حيث يؤمن الصلب المتانة الميكانيكية التى تسمح بدق القضيب الى أعمـــاق كبيرة بدون تلف،فى حين أن الغلاف النحاسى يحمى القضيب من التآكل والحت الالكتروليتى ويسمح باستخدام وصلة نحاس / نحاس بينه وبين موصـــل التأريض • ويجوز أيضا استخدام قضبان من الصلب الطـــرى المجلفن حيث أثبتت التجارب مقاومته العالية للتآكل •

ونظرا لحقيقة القول أنه ليس هناك أى جزء من التركيبات الكهربائية أكثر اهمالا أو نسيانا من الجزء الخاص بنظام التأريض ، فلذلك يجب تصميم وتنفيذ هذا الجزء بدقة وعناية كبيرة وباستخدام أجود المواد وأطولها عمرا؛ فمن الافضل اذا أن تكون الالكترودات اما من النحاس أو من الصلب المغلف بالنحاس الا فى بعض الحالات الخاصة التى يجب فيها الاخذ فى الاعتبار امكانية حـدوث تلف للكابلات أو المواسير أو الانشاءات المعدنية التى قد تتواجد بجـــوار الالكترود وذلك نتيجة للحت الالكتروليتى (انظر الفقرة 5.5)

وحيث أن المقاومة للارض بالنسبة لقضيب التأريض تعتمد على طول القضيب فقد اتفق أن يكون هذا الطول مساويا أو مضاعفا لطول قياسى محدد • وهذا الطول القياسى هو 8 قدم (2.4 متر) فى نظام القياس البريطانى و 3 متر فى نظام القياس المترى • ولدق الالكترود الى أعماق كبيرة يتم وصل طولين قياسيين أو أكثر باستخدام قارنة (*coupling*) خاصة لذلك • أما قطر القضيب فيتحدد بالصلابة

---

* الاسم التجارى هـــو *copperweld*

الميكانيكية اللازمة لدقه فى الارض٠وعلى أىحال يفضل الا يقل قطرالقضيب عن ½ بوصة والمقاس الاكثر استخداما هو 5/8 بوصة (16 مم)٠

وأنسب طريقة لدق القضبان فى الارض هى باستخدام مطرقة آلية وخاصة اذا كان عدد القضبان كبيرا أو التربة غير رملية أو طول القضيب أكثر من ثلاثة أمتار ٠ أما اذا كان عدد القضبان قليلا والتربة رملية وطول القضيب لا يزيد عن ثلاثة أمتار فيمكن استخدام مرزبة يدوية ٠

ونجد فى أغلب الاحيان أنه يجب دق أكثر من قضيب واحد للحصول على القيمة المطلوبة للمقاومة للارض ٠ ومن المفضل فى هذه الحالات الا تقل المسافة بين الالكترودات عن 3 متر ٠ وفى محطات المحولات الصغيرة تدق أربع قضبان تأريض أو أكثر على شكل مربع أو مستطيل حول حافة المنشآت ، ويفضل اذا أمكن تنفيذ ذلك عند قاع حفريات المنشآت ٠

3.2.5 موصلات التأريض وتوصيلات تأريض المعدات

فى أغلب الاحيان تتألف موصلات التأريض من كابلات مدفونة فى الارض٠ ويفضل أن تكون الكابلات من النحاس نظرا لمقاومته الكبيرة للتحات أو التآكل الكيمائى ٠ واذا كان الكابل عاريا فمن الجائز أن يتسبب فى تآكل معادن أخرى مدفونة فى الارض (انظر الفقرة 5.5) ٠ ولكن اذا كان الكابل قصيرا أو مدفونا بقرب سطح الارض وفى تربة جافة ولها مقاومية عالية ، يمكن اهمال التحات ٠ أما اذا كان الكابل طويلا وبالاخص اذا كان مدفونا فى أرض رطبة لها مقاومية صغيرة ، فيستحسن فى هذه الحالات استخدام كابل من النحاس عليه طبقة صامدة للماء ٠

ولا يجوز فى أى حال من الاحوال استخدام موصلات من الالومنيوم أو أى معدن آخر له أنودية مرتفعة وبالتالى قابلية كبيرة للتحات الكيمائى ٠ وفى المنشآت التى فيها أربعة قضبان تأريض أو أكثر ، يجب توصيل كل قضيب

بالآخر فى دائرة مقفلة بواسطة موصلات التأريض ثم توصيل هذه الـــدائرة بالتجهيزات الخاصة بتوصيله الارض وذلك عن طريق موصلين أو أكثر عــلى التـــوازى ٠

أما بالنسبة لتوصيلات تأريض المعدات ، فهى تكون عادة فوق سطح الارض ويمكن استخدام اما كابلات عارية أو قضبان من النحاس ٠ واذا كانت هـــذه التوصيلات معرضة للغمر فى الماء (نتيجة فيضانات أو سيول ألخ٠٠٠) فيجب استخدام كابلات عليها طبقة صامدة للماء ٠

4.2.5 التجهيزات الخاصة بتوصيلة الارض

تتألف هذه التجهيزات أساسا من ألواح أو من قضبان خاصة بالتأريض ٠ وتستخدم الالواح فى المنشآت الخرسانية الجديدة (أساسات المعدات، السراديب، الارصفة الممتدة فى البحر الخ٠٠) وتوضع الالواح فى أماكن مناسبة من الجسم الخرسانى وبحيث يكون الوجه المسطح للوح متساطحا مع سطح الخرسانة٠ ويتم توصيل موصلات التأريض بالالواح بواسطة قوامط خاصة يثبت فيهـــا موصل التأريض بمسامير أو باللحام ٠

وفى حالة المنشآت القائمة أو اذا كان تركيب الالواح غير عملى ، فيمـــكن استخدام قضبان خاصة بالتأريض ٠ وتثبت هذه القضبان على أسطح الجدران (أو جوانب الخنادق) فى أماكن مناسبة لعمل التوصيلات المستديمة أو المؤقتة٠ ولا يجوز تثبيت القضبان النحاسية بأى أجزاء حديدية ٠ ويجب الا يزيد قطر ثقوب التثبيت فى القضيب نفسه عن ربع عرض القضيب ٠ وبالنسبة لمحطات التوزيع التى لا يزيد عندها تيار القصر عن 22 كيلو أمبير ، تستخدم عادة قضبان لا يقل مقطعها عن 125 مم٢ (25 × 5 مم) ٠ ويتم توصيل القضبان بموصلات التأريض أو توصيلات تأريض المعدات امـــا ميكانيكيا أو باللحـــــام ٠

وفى المنشآت التى يحتوى هيكلها على قضبان زاوية (أو مجرى) تثبت أو تركب عليها المصهرات ومفاتيح الفصل وحوامل الكابلات ، يمكن استخدام هذه

القضبان لتأريض أجسام هذه المعدات بشرط أن تكون القضبان نفسها مؤرضة تأريضا جيدا • ويمكن استخدامها أيضا لتأريض أى أجهزة ثانوية عارضة وغير مركبة على القضبان • أما بالنسبة للاجهزة الرئيسية مثل المحولات والقواطع ، فيجب تأريضها عن طريق التجهيزات الخاصة حتى ولو كانت تلك الاجهزة مركبة على قضبان مؤرضة •

وجدير بالذكر أنه يرد فى كثير من المواصفات القياسية للدول المختلفة اشتراطات بعدم السماح لمرور تيار كهربى الا فى مساراته المحددة بالدوائر الكهربية •

3.5 الوصل فى نظام التأريض

هناك ثلاث طرق لاتمام التوصيل بين الكترودات التأريض وموصلات التأريض أو بين هذه الموصلات والتجهيزات الخاصة بتوصيلة الارض :

1 - توصيل ميكانيكى باستخدام قوامط مربوطة بمسامير • ويجب فى هذه الحالة أن تكون القوامط والمسامير من نفس معدن الالكترودات والموصلات، ويجب أن تكون الوصل محمية ضد حدوث أى عطب عرضى ومصممة بحيث تكون قابلة للتفتيش •

2 - توصيل عن طريق اللحام • وهناك عدة طرق للحام مثل لحام النحاس (*brazing*) أو لحام الفضة (*silver soldering*) أو لحام الثرميت (*Thermit*) لكن لا يجوز فى أى حال من الاحوال استخدام لحام القصدير (*soldering*) . وجميع أنواع اللحامات ولاسيما لحام الثرميت ، تحتاج الى خبرة ومهارة•

ومن مميزات اللحام امكانية استخدام موصلات تأريض أصغر حجما حيث أن درجة الحرارة المسموح بها فى حالة النحاس هى $450^{0}C$ للوصل الملحومة بدلا من $250^{0}C$ للوصل الميكانيكية •

3 - توصيل عن طريق الكبس وذلك باستخدام جـــلبة خاصة من النحاس أو النحاس السبائكى يتم كبسها على قضيب التأريض وموصل التـــأريض فى نفس الوقت وذلك بواسطة مكبس هيدروليكى خاص ٠ وهذه الطريقة هى أحدث الطرق وأكثرها اقتصادا ولها كل مميزات لحام الثرميت ٠

وأيا كانت الطريقة المستخدمة فيجب قبل عمل الوصل التأكد من نظـافة الاسطح وخلوها تماما من الشحم أو الدهان أو أى طبقة عازلة ٠

4.5 عدد قضبان التأريض ومقاس توصيلات التأريض

ان العدد اللازم من قضبان التأريض للحصول على أقصى قيمة مسمـوح بها لمقاومة الارض يعتمد أساسا على مقاومية التربة ٠ ومن الناحية العملية يتـــم وضع اما العدد التقديرى من القضبان اللازم للحصول على المقاومة المرغوب فيها أو أدنى عدد من القضبان اللازم لتحمل تيار القصر ٠ وتقاس بعد ذلك المقـاومة للارض وتوضع قضبان اضافية اذا احتاج الامر لذلك ٠

وعند اختيار مقاسات الموصلات يجب الاخذ فى الاعتبار العوامل الآتية :

1 - عدم انصهار الموصل وعدم تدهـــور الوصـــل الكهربية تحت أسوأ الظروف من حيث حجم تيار القصر وزمن دوام هذا التيار ٠

2 - المتانة الميكانيكية ٠

3 - صغر المقاومة الكهربية بحيث لا يتسبب مرور تيار القصر فى ظهـور فروقات خطرة فى الجهد ٠

ويمكن حساب مقطع موصلات التأريض من المعادلة الآتية :

$$A = \frac{I\sqrt{t}}{C} \qquad (1 - 5)$$

حيث A = أصغر مقطع مسموح به (مم٢)

I = تيار القصر (أمبير)

t = زمن دوام التيار (ثانية) وهو الزمن بين حدوث القصر وبين ازالته عن طريق أجهزة الوقاية (المرحلات والقواطع) ٠

C = ثابت ٠ وتعتمد قيمته على مادة الموصل وأقصى درجة حرارة مسموح بها ٠

= 166 للنحاس عند درجة حرارة 250^0C اذا كانت الوصل مربوطة بمسامير

= 200 " " " " 450^0C اذا كانت الوصل ملحومة بالنحاس

= 285 " " " " 1083^0C بدون أى وصل

ويبين الجدول 5 - 1 أدنى مقطع لكل أمبير من تيار القصر للموصلات النحاسية

جدول 5- 1 مقطع موصلات التأريض النحاسية لكل أمبير من تيار القصر

زمن دوام تيار القصر [ثانية]	المقطع لكل أمبير من تيار القصر [مم٢]		
	موصل به وصل مربوطة بمسامير	موصل به وصل ملحومة بالنحاس	موصل بدون وصل
0.5	4.2×10^{-3}	3.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}
1	6×10^{-3}	5×10^{-3}	3.5×10^{-3}
4	12×10^{-3}	10×10^{-3}	7×10^{-3}

ويبين الجدول 5 - 2 أقل عدد من الكترودات التأريض على شكل قضبان قياسية (16 مم قطر و 3 م طول) التى يجب وضعها والحد الادنى لمقاسات الموصلات التى يجب استخدامها فى نظام التأريض ، وذلك فى حالة المنشآت التى بها محولات وفى حالة المنشآت التى ليس بها محولات ٠

جدول 5 - 2 عدد قضبان التأريض ومقاس الموصلات فى نظام التأريض

التيار المقنن بالنسبة للجهد المنخفض لمحول أو لمجموعة محولات (أمبير)	أقل عدد من قضبان التأريض		الحد الادنى لمقاس الموصلات فى نظام التأريض (مم٢)		
	قضيب قياسى 16 مم × 3 م	قضيب متعدد الاطوال	موصلات التأريض المدفونة موصل واحد	موصلات التأريض المدفونة موصلات على التوازى	توصيلات تأريض المعدات
حتى 200	1	1	16		16
201 — 400	2	1	25	2 — 16	25
401 — 800	4	2	70	2 — 25	70
801 — 1600	8	4	120	2 — 70	120
1620 — 2400	12	6		3 — 50	120
مقاس موصل القوى (مم٢)					
أقل من 35	1	1	16		16
50 — 95	2	1	25	2 — 16	25
120 — 240	4	2	70	2 — 25	70
أكبر من 240	8	4	120	2 — 70	120

5.5 النحات أو التآكل الكيمائى *(Corrosion)*

اذا تواجد معدنين مختلفين ومنفصلين فى وسط رطب ، أو تواجدت وصلة من هذين المعدنين فى مكان رطب ، نجد أن مع مرور الوقت يحدث تآكلا لاحدى المعدنين • والسبب فى ذلك هو الفعل الالكتروليتى الذى يؤدى الى تحات المعدن الاكثر أنودية • ويبين الجدول 5 - 3 الترتيب الجلفانى لعدد من المعادن ؛ ويعتبر معدنا أكثر أنودية من معدن اخر اذا كان يسبقه فى الترتيب ، فمثلا الصلب المجلفن أكثر أنودية من النحاس (فرق الجهد بينهما هو 0.8 فولت) ولكن النحاس أكثر أنودية من الذهب (فرق الجهد بينهما هو 0.4 فولت) • واذا تواجدت ماسورة من الصلب المجلفن مدفونة بجوار الكترود (أو أكثر) تاريض من النحاس ، فان ذلك يؤدى الى تحات الماسورة ولا يصاب النحاس بأي ضرر وقد يتكون حوله طبقة من الاملاح نتيجة للفعل الالكتروليتى •

ويعتمد معدل الحت الكيمائى على الفرق فى الجهد الجلفانى بين المعدنين • ولأى معدنين فان معدل حت المعدن الاكثر أنودية يتناسب طرديا ومساحة الكاثود وعكسيا ومساحة الانود •

جدول 5 - 3 **الجهد الجلفانى للمعادن المختلفة**

المعدن	الجهد الجلفانى
أنود	
المغنيزيوم وسبائكه	— 1.6
صلب مجلفن	— 1.05
حديد مجلفن	— 1.05
الومنيوم	— 0.75
حديد الزهر	— 0.7
ديورألومين	— 0.6

الرصـــــاص	— 0.55
الصفيح (صاج مطلى بالقصدير)	— 0.5
صلب مطلى بالكروم (سمك 0.005 بوصة)	— 0.5
صلب الكروم 18/2	— 0.35
النحاس وسبائكه	— 0.25
لحام الفضــة	— 0.2
صلب مطلى بالنيكل	— 0.15
الفضة والنحاس المطلى بالفضة	0.0
الكــــربون	+ 0.10
الــذهب	+ 0.15
البـــلاتين	+ 0.15
كاثـــود	

اذا كانت وصل التأريض مكونة من معدنين مختلفين فيجب مراعاة النقــاط التـــالية ،

1 — ألا يكون المعدن الاكثر أنودية هو جسم المعدات أو الانشآت • فمثلا اذا أردنا توصيل برج من الصلب المجلفن الى نظام تأريض من النحاس فيجب أن يتم ذلك بواسطة شريط صلب مجلفن بحيث يسهل تغيره فى حالة حدوث تحات بينه وبين النحاس •

2 — أن تكون الوصل فوق سطح الارض •

3 — أن تكون الوصل محمية من الرطوبة •

4 — أن تكون الوصل فى أماكن يسهل الوصول اليها لغرض التفتيش

5 — أن يتم التفتيش على الوصل مرة كل عام •

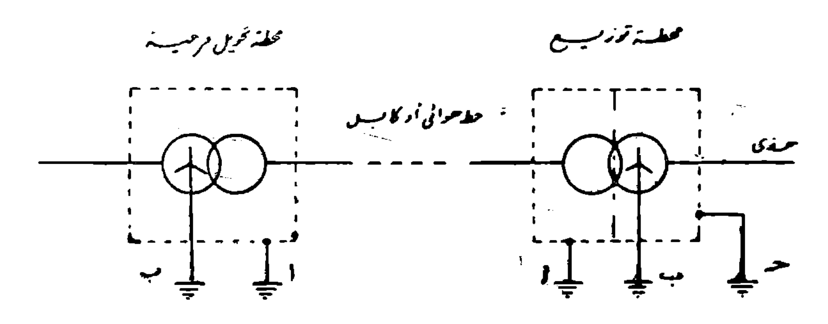
6.5 القواعد العامة لنظم التأريض عند محطات التحويل الفرعية

يبين الشكل 5 - 3 نظم التأريض المختلفة لشبكة مبسطة مكونة من محطة تحويل فرعية ومحطة توزيع تغذى شبكة جهد منخفض • وجدير بالذكر هنا أننا نعنى بالجهد المنخفض الجهد الـــذى لا تزيد قيمته عن 1000 فولت • ونظم التأريض المختلفة هى الآتية :

أ) تأريض وقائى للجهد العالى وهو نظام تأريض جميع الاجـــزاء المعدنية (هياكل المعدات وأغلفة كابلات القوى الخ) التابعة لشبكة الجهد المرتفع •

ب) تأريض نقطة التعادل

ج) تأريض وقائى للجهد المنخفض وهو نظام تأريض جميع الاجزاء المعدنية التابعة لشبكة الجهد المنخفض •



شكل 5 - 3

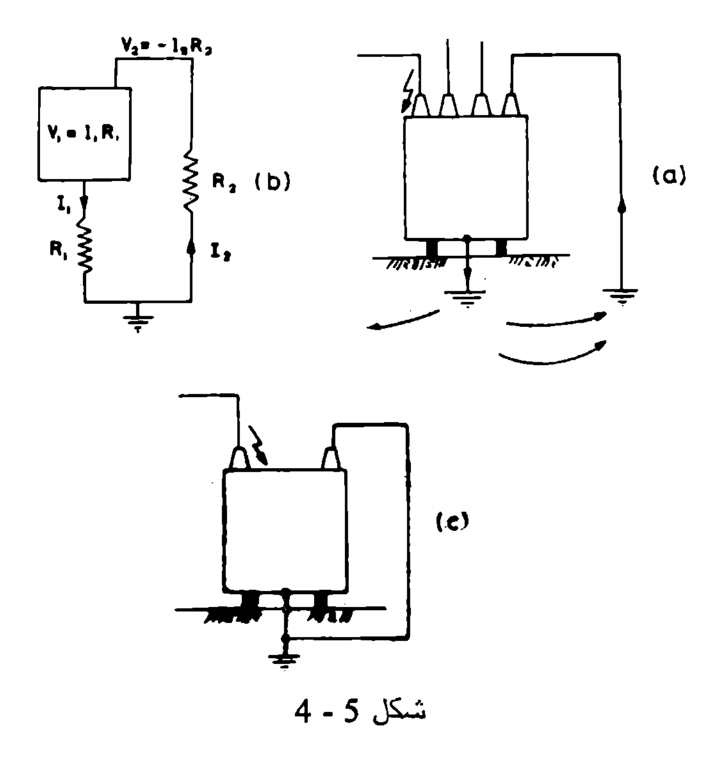
والسؤال هنا هو هل من الافضل أن يكون كل نظام للتأريض منفصــلا عن الآخر أم من الافضل أن تكون هناك نقطة تأريض واحدة مشتركة ؟ ورغم أنه ليس هناك ردا قاطعا لهذا السؤال الا أن الخبرة الطويلة فى مختلف أنحاء العالم قد بينت أنه يجب الالتزام بالتوصيات الآتية :

أولا : بالنسبة لمحطات التحويل الفرعية التى لا يخرج منها أى دوائر جهد منخفض •

يوصى باستخدام تأريض مشترك لنقطة التعادل وللتأريض الوقـــائى والسبب فى ذلك هو الآتى :

اذا حدث خطأ داخل المحطة بين موصل وجسم معدنى مؤرض ففى حـــالة فصل نظامى التأريض (شكل 5 - 4a) يمر تيار القصر بأكمله عبر التأريض الوقائى ويمر جزء منه ، عن طريق الارض ، فى الموصل المحايد • وفى هذهالحالة نرى أن جهد الاجزاء المعدنية المؤرضة سيرتفع بمقدار يساوى حاصـــل ضرب تيار القصر والمقاومة للارض لالكترود التأريض الوقائى أى $I_1 R_1$ ، فى حين أن جهد نقطة التعادل سيصبح $I_2 R_2$ — بدلا من صفر (شكل 5 - 4b) .

ونرى أن فى هـذه الحـــالة يجب :



شكل 5 - 4

أ) عزل موصل نقطة التعادل عن جميع الاجزاء المعدنية بحيث يتحمل العزل أقصى جهد يمكن أن يرتفع اليه هذا الموصل (ويتحدد هذا الجهد بحجم تيـار القصر وحجم مقاومات التأريض)•

ب) ضمان عدم امكانية لمس موصل التعادل وأى جزء معدنى فى نفس الوقت •

وجدير بالذكر أن احتمال مرور تيارات كبيرة بين نقطتى الارض فى مساحة أرض محدودة محفوف ببعض المخاطر • أما فى حالة استخدام نقطة واحدة مشتركة للتأريض الوقائى ولتأريض نقطة التعادل (شكل 5 - 4 c)نجد أن الخطر الوحيد هو ارتفاع جهد الاجزاء المعدنية عند حدوث الخطأ • ولكن يمكن تجنب هذا الخطر باختيار نظام تأريض له مقاومة منخفضة للارض وأجهزة وقاية سريعة العمل بحيث لا تتخطى قيمة جهد اللمس الحد الاقصى المسموح به (انظر 2.4) •

الحائل الوقائى :

ان مسألة توصيل الحائل الوقائى المحيط بالمحطة بأرض منفصلة أو بأرض المحطة يعتمد أساسا على الخطر النسبى الذى قد يتعرض له أفراد أو حيوانات خارج الحائل عند لمسه ، وأفراد داخل الحائل من المحتمل أن يلمسوا فى آن واحد الحائل وأى أجهزة موصلة بأرض المحطة • واذا كان هذا الاحتمال غير قائم أو يمكن تفاديه بطرق أخرى ، فيفضل أن يكون تأريض الحائل منفصلا عن تأريض المحطة •

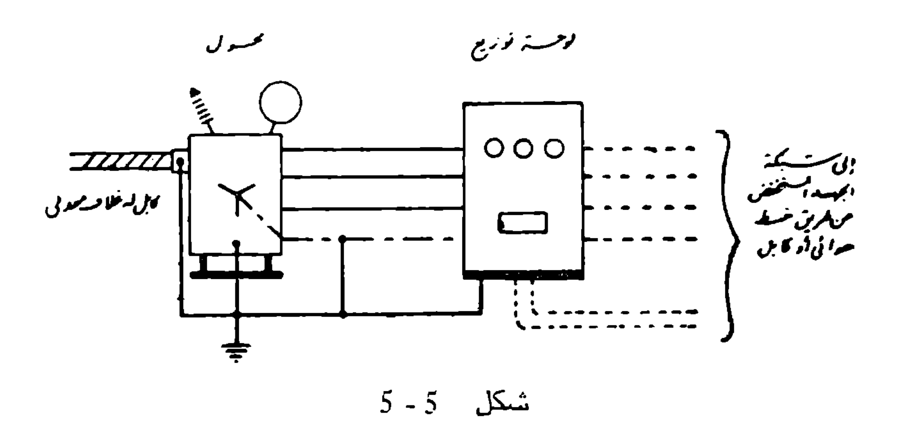
ثانيا : بالنسبة لمحطات التحويل التى **تغذى** شبكة جهد منخفض خارجية ولها **موصل تعادل** •

ان أغلب هذه **المحطات هى محطات** توزيع • وقرار فصل كل نظام تأريض عن الآخر أو استخدام تأريض واحد مشترك أو تأريضين مشتركين مع فصل الثالث ، يعتمد أساسا على ضمان عدم ارتفاع جهد الموصل المحايد عند حدوث خطأ للأرض عند جانب الضغط العالى الى قيمة تشكل خطرا على المنتفعين أو تتسبب فى اشعال حريق •

وبما انه يوجد أنواع مختلفة من هذه المحطات من حيث نوع التركيبات

والتوصيلات الخاصة بها ، فسوف نذكر فيما يلى القواعد المتبعة بالنسبة لجمع أو فصل التأريضات لهذه الانواع ٠

1 - اذا كانت موصلات التغذية الداخلة الى المحطة أو الخارجة منها على شكل كابلات لها غلاف معدنى (*metal sheath*) من الرصاص أو الالومنيوم عليه طبقة شبه موصلة (أو غير جيدة العزل) وطولها فى اتجاهين مختلفين 3 كيلو متر أو أكثر (وذلك لضمان مقاومة صغيرة للارض – فى حدود أوم واحد أو أقل) ، فيمكن استخدام نقطة تأريض واحدة مشتركة كما هو مبين فى الشكل 5 - 5 .



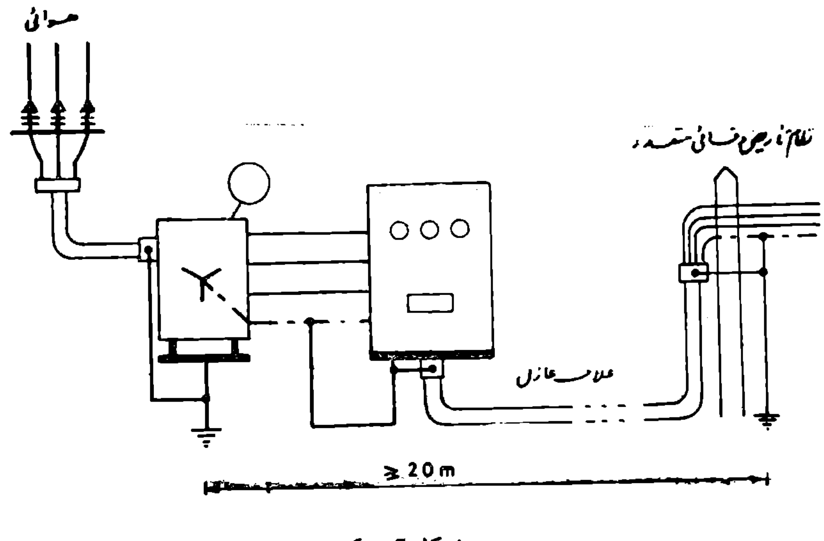
شكل 5 - 5

2 - اذا كانت المحطة مغذاة عن طريق خط هوائى والموزعات الخارجة منها هى كابلات لها غلاف خارجى عازل (ثرموبلاستيك) ، فيمكن التفرقة بين حالتين :

أ) اذا كان الكابل الخارج من المحطة يغذى شبكة مستوفية شروط التأريض الوقائى المتعدد (انظر الفقرة 3.7.5) ففى هذه الحالة يجب فصل التأريض الوقائى للجهد العالى عن التأريض الوقائى للجهد المنخفض بحيث يكون كل تأريض منهما خارج مساحة المقاومة للتأريض الآخر ، أى أن تكون المسافة بينهما 20 مترا أو أكثر (فقرة 6.3).

وفى هذه الحالة يتم توصيل التأريض الوقـــائى للجهد المنخفض بالموصل المحايد كما هو مبين فى الشكل 5 - 6 .

ب) اذا كان من الصعب فصل التأريض الوقائى للجهد العالى عن التأريض الوقائى للجهد المنخفض ، وذلك فى الحالات التى يكون فيهـــا هيكل المحطة من الصلب أو من الخرسانة المسلحة ، فيمكن استخدام نقطـــة تأريض وقائى مشتركة كما هو مبين فى الشكلين 5 - 7 و 5 - 8 . ويجب التأكد من أن العزل لجميع موصلات الجهـــد المنخفض داخـل مساحة المقاومة كافيا لتحمل الارتفاع فى جهد الاجزاء المعـــدنية عنـد حدوث خطأ للارض من ناحية الجهد العالى ٠



شكل 5 - 6

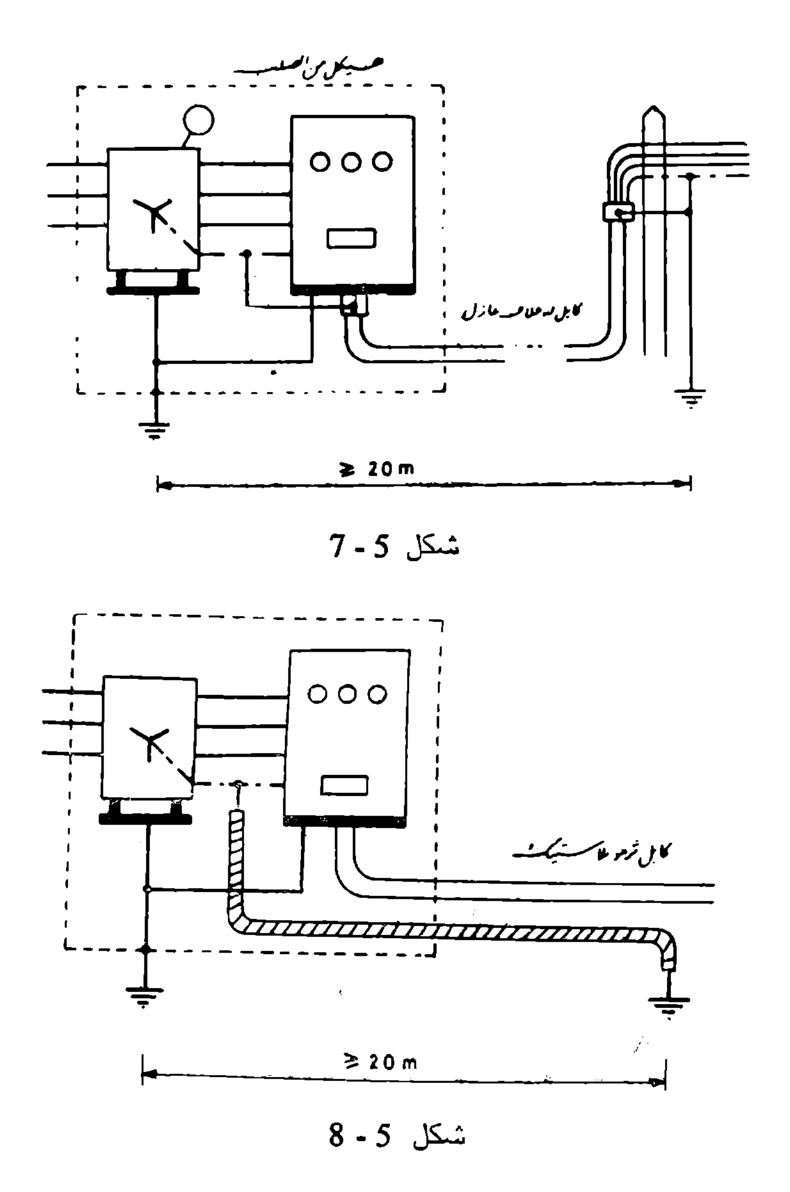
7.5 الاجـــراءات الوقائية بالنسبة للمستهلك

لحماية المستهلك من الصدمة الكهربية فى حالة حدوث خطأ بين موصل حى وبين أى جسم معدنى معرض للمس ، يجب تحقيق المتطلبات الاساسية الآتية :

أولا : ضمان وجود دائرة مغلقة يمر بها تيـــار القصر ٠ ويجب أن تكـــون

مقاومة هذه الدائرة صغيرة بحيث يكون حجم تيار القصر كافيا لتشغيل أجهزة الوقاية عند المستهلك ، مثل المصهرات أو القواطع ·

ثانيا : ضمان عدم ارتفاع جهد الاجسام المعدنية المعرضة للمس (هياكل الاجهزة مثلا) الى قيمة قد تشكل خطرا على الاشخاص ·

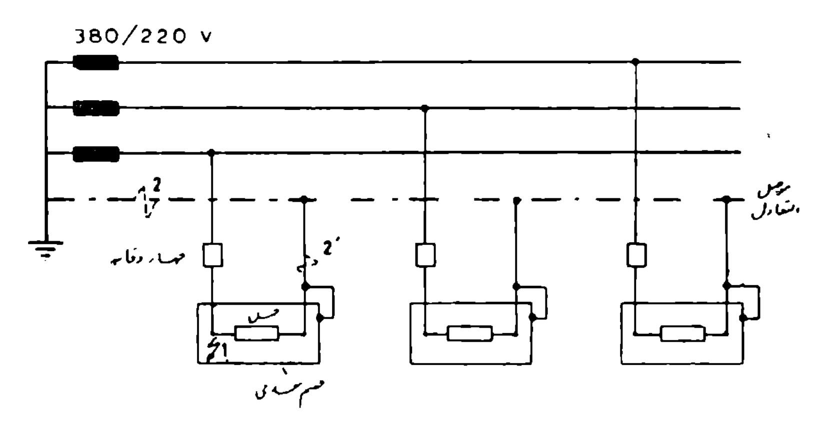


شكل 5 - 7

شكل 5 - 8

يبين الشكل 5 - 9 احمال مغذاة من شبكة توزيع لها موصل تعادل مؤرض

عند المحول · ففى حالة حدوث قصر بين موصل حى والجســـم المعدنى (1 فى الشكل) يقوم موصل التعادل بتأمين خط عودة لتيار القصر ، وبذلك يكــون المتطلب الاول مستوفيا · أما فى حالة حدوث قطع فى موصل التعادل عند النقطة 2 أو $2'$ ، ففى هذه الحالة يرتفع جهد الجسم المعدنى الى جهد الموصل الحى عند توصيل الحمل ، وهذا يشكل خطرا كبيرا على المنتفع · من الواضح اذا أن مثل هذه التوصيلات لا تحقق المتطلبات الاساسية السالفة الذكـــر لضمان أمـــانة المستهلك ولذلك فلا يجوز استخدامها ·



شكل 5 - 9

وهناك ثلاثة نظم تفى بمتطلبات الامن :

1 — نظام التأريض المباشر (*direct earthing*)

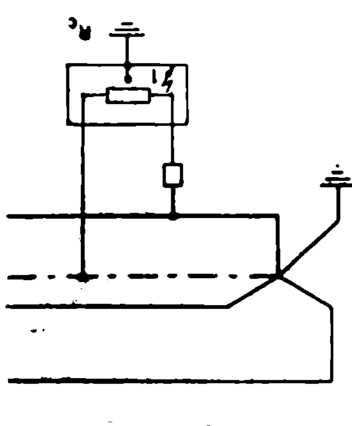
2 — نظام استخدام موصل وقائى مستقل
(*separate neutral and protective conductor*)

3 — نظام التأريض الوقائى المتعدد
(*Protective Multiple Earthing - PME*)

وسنصف فيما يلى كل نظام على حدة ·

1.7.5 نظام التأريض المباشر

فى هذه الطريقة يجب انشاء نقطة تأريض خاصة بكل مستهلك أو مجموعة من المستهلكين (شكل 5 - 10) · وفى حالة حدوث قصر بين موصل حى وأى جزء معدنى (1 فى الشكل)، تقوم الارض بمقام موصل العـــودة لتيار القصر · ويجب ألا تزيد قيمة المقاومة R_c لالكترود التأريض عن ،



شكل 5 - 10

$$R_c \leqslant \frac{V_t}{k\, I_N} \qquad (2-5)$$

حيث

$V_t=$ جهد اللمس المسموح به · وبما أن القواطع السريعة ليست متوفـرة فى أغلب الاحيان بالنسبة لصغار المستهلكين ، فان اللجان الدولية للتقنين فى صدد تحديد 50 فولت كأقصى قيمة يسمح بها لجهد اللمس ·

I_N = التيار المقنن لجهاز الوقاية (مصهر أو قاطع)

k = عامل يعتمد على نوع جهاز الوقاية المستخدم

= 3 فى حالة المصهرات

$= 1.5$ فى حالة قواطع تجاوز الحمل*

وإذا فرضنا أن

$I_N = 50$ أمبير ، $k = 3$ ، $V_t = 50$ فولت

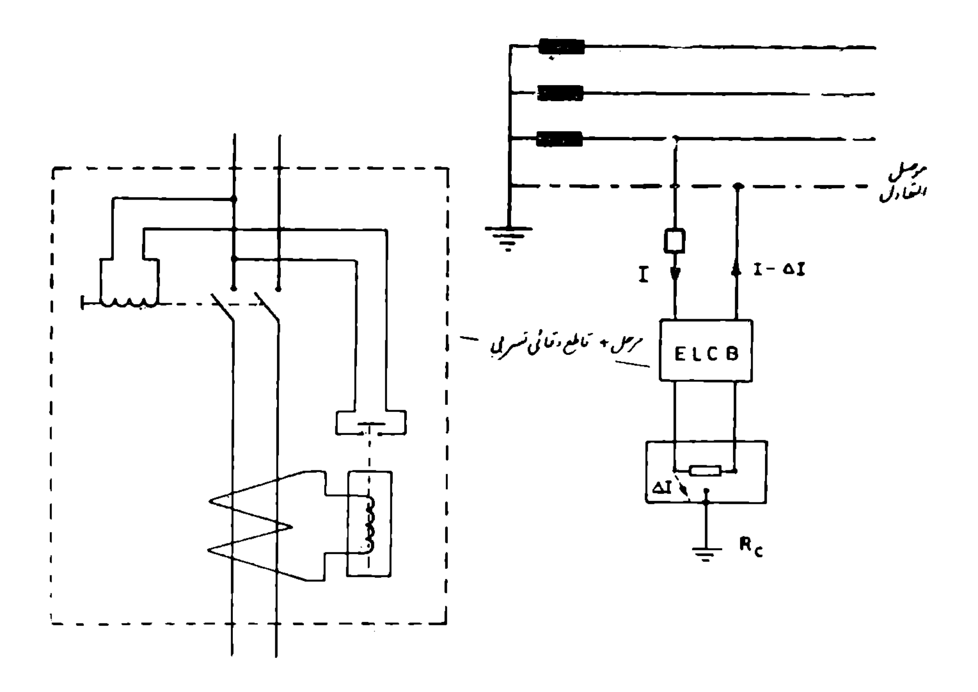
نجـــد أن

$R_c \geqslant 1/3$ أوم

وحيث انه من الصعب جدا التوصل الى مثل هذه القيم الصغيرة للمقـــاومة بـدون تـكاليف باهظـــة لنظـــام التـــأريض ، فـــان هـذا النـــوع مـن التـــأريض غيـر اقتصــــادى الا فى حـــالة اســـتخدام قواطـــع خاصـــة *(current - operated earth leakage circuit breakers)* حساســـة لتيـار التسرب للارض (شـــكل 5 - 11) وحيث أن تيـــار التسرب المقدر لتشغيل هذه القواطع هو 0.5 (أو 0.03) أمبير ، فيمكن فى هذه الحالة أن ترتفع قيمة مقاومة التأريض R_c المسموح بها الى 100 (أو 1670) أوم · ونظرا للحساسية الكبيرة لهذه القواطع لاى تيـــــار تسرب ، يمكن استخدامها كوقاية ضد احتمال نشوب حريق فى حـــالة حدوث أى خطأ للارض حيث أن الطاقة الحرارية المولدة عند نقطة الخطأ (نتيجة لمرور تيار أصغر من حســـــاسية القاطع) لا تكفى لاشعال حريق · وجدير بالذكر أن هذه القواطع تحتاج صيـانة دورية ، وفى أغلب الاحيان تحتوى وحدة القاطع والمرحل على دائرة خاصـــــة لاختبار سلامة تشغيل الجهاز ·

---

* جـدير بالـذكر أن هـــذه القيم لـ k هى قيم نموذجية ويجب مراجعـة المواصفات القياسية للدول المختلفة لتحديد قيمة k المثلى بالنسبة لنوع جهـاز الوقاية المستخدم ·



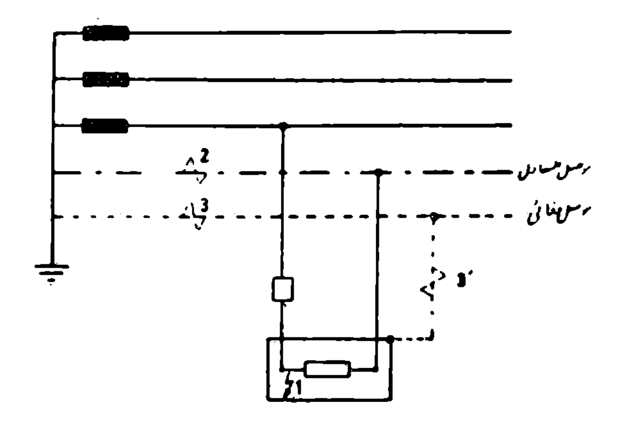
شكل 5 - 11

2. 7. 5 نظام استخدام موصل وقائى مستقل

يتكون هذا النظام من خمسة موصلات بدلا من أربعة ، كما هـو مبين فى الشكل 5 - 12 ويعرف الموصل الخامس بالموصل الوقائى ٠

وتوصل جميع الاجزاء المعدنية للاجهزة بالموصل الوقائى ٠ ويقـوم هـذا الموصل بوظيفة موصل العودة لتيار القصر فى حالة حـدوث خطأ للأرض بين موصل حى والجسم المعدنى (نقطة 1 فى الشكل) ، فيعود تيار القصر الى المنبع عن طريق هذا الموصل بدلا من أن يعود عن طريق موصل التعادل فى النظـام المبين فى الشكل 5 - 9 أو عن طريق الارض فى النظام المبين فى الشكل 5-10.

وفى هذا النظام نجد أن الخطر الوحيد على المستهلك ينشأ عند حدوث خطأ مزدوج عند النقطة 1 وقطع فى الموصل الوقائى عند 3 أو ′3٠



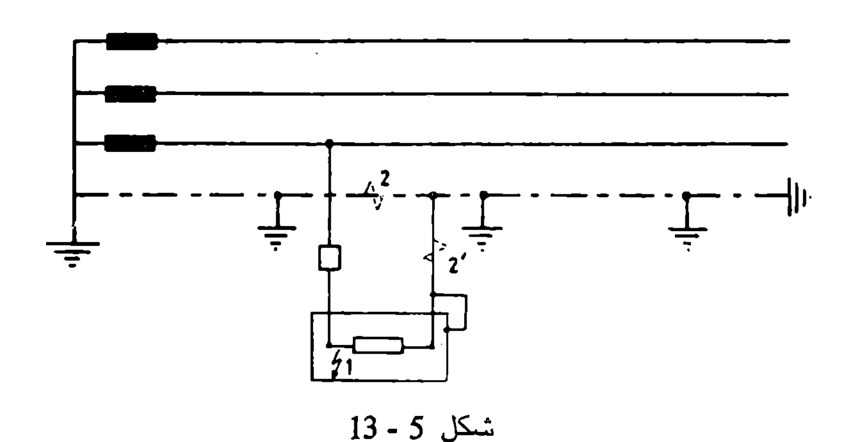
شكل 5 - 12

وفى الكابلات المدرعة التى لها غلاف معدنى (الكابلات المعزولة بالورق) يمكن استخدام الغلاف (وهو من الرصاص) والدرع معا كموصل وقائى ولكن فى هـذه الحالة يجب التأكد من أن جميع الوصل يمكنها أن تتحمل التيار المار فى الغلاف· وفى حالة استخدام صناديق توصيل غير معدنية يجب ضمـــان الاستمـرارية الكهربية للغلاف باستخدام وصلة تخطى لا تزيد مقاومتها عن مقاومة طـــول الغلاف المقطوع· أما بالنسبة للكابلات المدرعة فقط ، ففى أغلب الاحيان (الا اذا كان الدرع مزودا بسلوك نحاسية) يصعب الحصول على مقاومة للدرع صغيرة بما فيه الكفاية بحيث يتمكن تيار العودة من تشغيل أجهزة الوقاية عند المستهلك فى حالة حدوث خطأ للارض ·

5. 7. 3 نظام التأريض الوقائى المتعدد

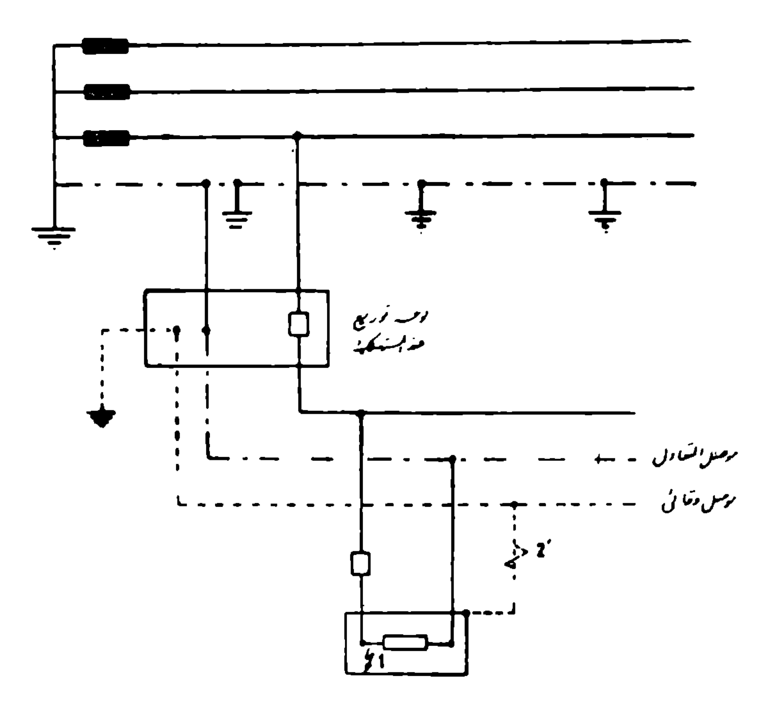
فى هذا النظام يستخدم موصل التعادل لشبكة التوزيع كخط عـــودة لتيار القصر عند حدوث خطأ للارض· ولتفادى عيوب النظام المبين فى الشكل 5 - 9 يتم تأريض موصل التعادل عند محول التوزيع ، عند نهاية المغذى وعنـــد نقط متعددة (شكل 5- 13) على طول المغذى (حوالى ثلاث نقط فى كل كيلو مـــتر) بحيث لا تزيد مقاومة سلك التعادل للأرض عند أى نقطة عن 10 أوم (أو أى

قيمة أخرى تحددها الهيئة المسئولة عن التوزيع) · ومن الواضح ن حدوث قطع فى موصل التعادل الرئيسى (نقطة 2 فى الشكل) لا يشكل خطرا على المستهلك



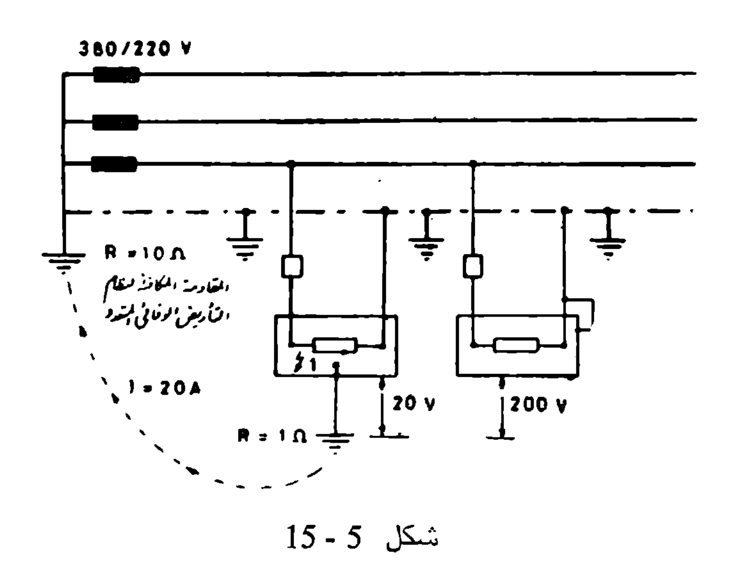
شكل 5 - 13

حتى اذا حدث ، بالاضافة الى هذا القطع ، قصر بين موصل حى والجسم المعدنى للجهاز (نقطة 1 فى الشكل)حيث أن فى هذه الحالة تقوم الأرض بمقام موصل



شكل 5 - 14

العودة لتيار القصر • أما فى حالة حدوث قطع فى موصل التعادل الخاص بالمستهلك (نقطة $2'$ فى الشكل) فيتسبب ذلك فى ارتفاع جهد الجسم المعدنى الى جهد الموصل الحى عند توصيل الحمل • ولتفادى هذا يستحسن استخدام موصل وقائى منفصل كما هو مبين فى الشكل 5 - 14 ففى هذه الحالة ليست هناك أى خطورة على المستهلك الا فى حالة حدوث خطأ مزدوج : قطع فى الموصل عند $2'$ وقصر عند $1'$.



شكل 5 - 15

ويجب مراعاة أنه لا يجوز فى أى حال من الاحوال استخدام نظام التأريض المباشر (1.7.5) مع أى من النظامين الآخرين • ويوضح المثال التالى السبب فى ذلك • فلنفرض أن لدينا شبكة تعمل بنظام تأريض وقائى متعدد ثم أضفنا اليها حملا له نظام تأريض مباشر (شكل5 - 15) • فعند حدوث قصر بين موصل حى والجسم المعدنى عند النقطة 1 مثلا ، يمر تيار مقداره $220/11=20$ أمبير ، ويرتفع جهد موصل التعادل الى $10 \times 20=200$ فولت ، ويظهر هذا الجهد على جميع الاجسام المعدنية الموصلة بسلك التعادل •

المراجـــــع

1. G. T. Tagg, Earth Resistances, Newness, London, 1949.
2. V. Manoilov, Fundamentals of Electrical Safety, MIR Publishers, Moscow, 1975.
3. W. F. Cooper, Electrical Safety Engineering, Butterworth, London, 1978.
4. IEEE Std. 80 - 1976, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
5. National Electrical Safety Code — American National Standards Committee C2.
6. British Standard Code of Practice, CP 1013 b 1965, Earthing.
7. Grounding of Industrial Power Systems, AIEE Publication 953, 1956.
8. Safety in Alternating Current Substation Grounding, AIEE Publication 80, 1961.
9. Practical Grounding, Copperweld Steel Co., Publication No. 143 - 8 - 74. USA

10. Copper for Earthing, Copper Development Association, London.

11. G. G. Seip, Electrical Installations Handbook, Siemens AG, Berlin, 1979.

12. J. H. Watt, American Electricians Handbook, McGraw Hill, New York, 1976.

رقم الايداع بدار الكتب	٨٣/٣١٨٨
الترقيم الدولى ISBN	٩٧٧ ـ ١٠٠ ـ ٠٢٨ ـ ٤

